

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211704

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

王祥君¹, 李战龙², 王海云¹, 杨志千²

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049;

2. 北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100176)

摘要: 通过直流风电机组(DC wind turbine, DCWT)建设直流风电场实现风能的直流汇集与直流传输是海上风电系统的主要发展方向之一。为了使 DCWT 具备高压绝缘隔离、能量双向流动以及直流短路故障自清除能力, 提出了一种适用于串联型全直流发电系统的新型 DCWT 拓扑。该 DCWT 拓扑采用了 H 桥结构的 DC/DC 变换器代替传统的隔离型 DC/DC 变换器, 将 DCWT 直接串联并加以调制实现低压直流到高压直流的变换。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了基于新型 DCWT 的串联型全直流发电系统仿真模型。经风电系统的 DCWT 在输出功率均衡、输出功率不均衡、高压直流母线电压波动等稳态运行工况以及故障 DCWT 动态切入切出等故障运行工况下的仿真, 验证了该 DCWT 的输出特性、系统的运行特性以及系统对故障 DCWT 的处理能力, 提高了直流风电场的运行可靠性与灵活性, 为直流风电场的建设提供了一种切实可行的解决方案。

关键词: 直流风电机组; 全直流发电系统; 串联; 稳态运行状态; 故障运行状态; 故障处理

Design and research of a series all-DC power generation system based on a new DC wind turbine

WANG Xiangjun¹, LI Zhanlong², WANG Haiyun¹, YANG Zhiqian²

(1. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy power Generation and Grid

Connection, Xinjiang University, Urumqi 830049, China; 2. Beijing Goldwind Science & Creation

Wind Power Equipment Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: It is one of the main development trends of offshore wind power system to develop a DC wind farm consisting of a DC wind turbine (DCWT) in order to realize DC collection and DC transmission in wind energy. In order to reach functions of DCWT in high-voltage insulation isolation, bidirectional energy flow and DC short-circuit fault self-cleaning, a new DCWT topology suitable for series-connected wind farms is proposed. Adopting a DC/DC converter with H-bridge structure in place of the traditional isolated DC/DC converter, DCWT directly connected in series and modulated can realize the conversion from low-voltage DC to high-voltage DC. Based on PSCAD/EMTDC, the simulation model of DCWT series-connected wind farm is built. Through the simulation of the DCWT of the wind system under steady-state operation conditions such as balanced output power, unbalanced output power, voltage fluctuation of high-voltage DC bus, and fault operation conditions such as dynamic cut-in and cut-out of faulted DCWT, it verifies the output characteristics of the DCWT, the operational characteristics of the system, and the processing capacity of the system for fault DCWT. This improves the operational reliability and flexibility of DCWT, and provides a practical solution plan for the construction of a DC wind farm.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1507005).

Key words: DC wind turbine; all-DC power generation system; series-connected; steady state operation state; fault operation status; fault handling

0 引言

海上风电因具有资源丰富、不占用土地、对环境

影响小和适宜大规模开发等优点, 有着巨大的发展潜力^[1-3]。随着海上风电场规模越来越大、离岸距离越来越远, 由交流电缆导致的风电场内网和传输电路的无功充电电流和过电压问题日益严峻, 迫切需要采用直流汇集-直流传输的风电全直流发电系统^[4-5]。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507005); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目资助(2020B02001)

按照风电全直流发电系统能量汇集方式的不同, 可以分为并联型和串联型 2 种^[6-7]。其中并联型全直流发电系统根据 DC/DC 变换器数量及其在风电场中的位置又可分为两级升压型、集中升压型和机端升压型三类。两级升压型和集中升压型需要大容量的 DC/DC 变换器且需要建设海上升压站, 极大地增加了系统建设成本^[8-9]; 机端升压型需要在每台 DCWT 内部实现高变比的直流变换, 受当前中高频变压器的制约, 难以在 DCWT 内部通过隔离型 DC/DC 变换器实现高变比升压^[10]。串联型全直流发电系统通过 DCWT 的直接串联实现电压等级的提升^[11], 虽然因 DCWT 与输电线路直接联接造成 DCWT 绝缘成本的提高, 但该系统不需要专门建设升压站和海上平台, 并且减少了海底电缆用量, 极大地降低了系统体积和建设成本, 具有广阔的应用前景^[12-13]。因此本文以基于 DCWT 的串联型全直流发电系统作为研究对象。

目前对基于 DCWT 的串联型全直流发电系统的结构和运行特性已经有了一定的研究, 但针对 DCWT 的输出特性、故障 DCWT 的投切逻辑以及系统在故障 DCWT 动态切入切出时的运行特性的文献尚不多见。文献[14]介绍了一种串联型直流集电系统, 风电场内网电压即为所有 DCWT 两端总电压, 可直接接入 HVDC 输电系统, 具有结构简单、投资成本低的优势, 但在一台 DCWT 发生故障后, 将该 DCWT 短接, 其他 DCWT 会产生过电压, 因此单台 DCWT 两端的电压不能过高且不能一次串联较多 DCWT。文献[15]提出串联型风电全直流发电系统中处于最高位的发电单元需要耐受直流线路对地电压, 增加了 DCWT 绝缘设计难度。文献[16]分析了直流风电场中串联 DCWT 的配置和运行特性, 提出一种电压限幅下的串联 DCWT 的变速控制策略, 减少了弃风量, 但其对故障 DCWT 条件下系统的分析不够深入。文献[17]提出一种新型直流串联型海上风电场拓扑, 能够通过分流电路使各 DCWT 在输出功率不一致时保持各 DCWT 出口电压不变, 但其结构和控制策略较为复杂, 实现难度较大。文献[18]提出一种基于直流集电器的全直流海上风电系统, 通过直流集电器实现各 DCWT 能量的汇集与升压, 降低 DCWT 间的耦合性, 同时实现 DCWT 在线故障控制与管理, 但该拓扑要求每台直流风电机组与直流集电器联接, 增加了电缆的使用量, 同时该直流集电器为半桥子模块结构, 不具备直流短路故障自清除能力, 需集成直流断路器才能快速切除直流侧短路故障。

为完善海上直流风电场方案, 本文在分析了

DCWT 和串联型全直流发电系统工作特性的基础上, 以保证 DCWT 具备高压绝缘隔离、能量双向流动、直流短路故障自清除能力, 以及以提高全直流发电系统的稳定性和灵活性为目标, 提出了一种适用于串联型全直流风电系统的新型 DCWT 拓扑。对基于 DCWT 的串联型全直流发电系统的结构与运行特性进行了分析, 介绍了系统的控制策略以及故障处理策略, 最后通过仿真验证系统的 DCWT 在稳态运行工况以及故障运行工况下的运行特性。

1 串联型全直流发电系统

1.1 串联型全直流发电系统的拓扑结构

本文提出一种基于新型 DCWT 的串联型全直流发电系统方案, 每台 DCWT 输出低压直流电压, 将 DCWT 直接串联形成高压直流, 通过高压直流输电线路输送到岸上 MMC 换流站, 再集中逆变到电网, 系统方案如图 1 所示。

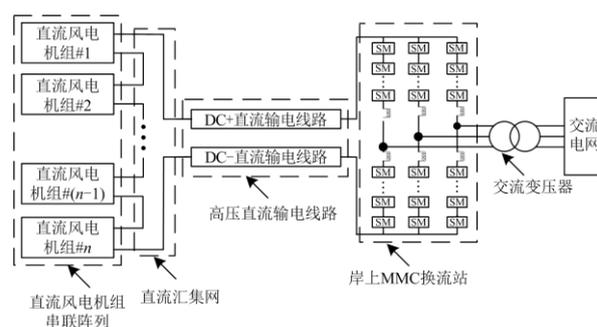


图 1 串联型全直流发电系统

Fig. 1 Series-connected all-DC power generation system

1.2 新型 DCWT 拓扑结构

DCWT 是组建直流风电场的基本发电单元, 其拓扑结构、输出特性及连接方式决定了风电场的运行特性。考虑 DCWT 具备高压绝缘隔离、能量双向流动以及直流短路故障自清除的能力, 提出了一种新型的 DCWT 系统拓扑, 如图 2 所示。

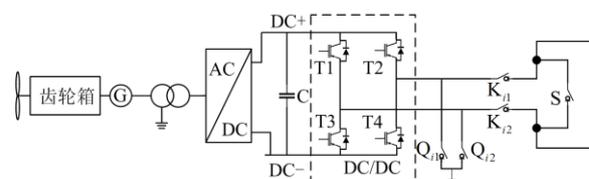


图 2 新型 DCWT 系统结构

Fig. 2 New DCWT system structure

新型 DCWT 由齿轮箱、交流风力发电机、隔离变压器、电压源型 AC/DC 换流器、直流支撑电容、基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器、直流隔离开关 (K_{i1} 、 K_{i2})、接地开关 (Q_{i1} 、 Q_{i2}) 以及直流旁路开

关(S)组成。其中,隔离变压器的变比为 1:1,可以实现高压绝缘隔离,降低风力发电机的耐压要求;基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器使串联的 DCWT 能够在其出口处形成一条通路,使电流能时刻流经整个串联 DCWT 系统。

1.3 串联型全直流风电场的运行特性

串联型全直流风电场如图 3 所示,其中 $U_{H,i}$ 为 DCWT 的 DC/DC 变换器机侧直流电压。

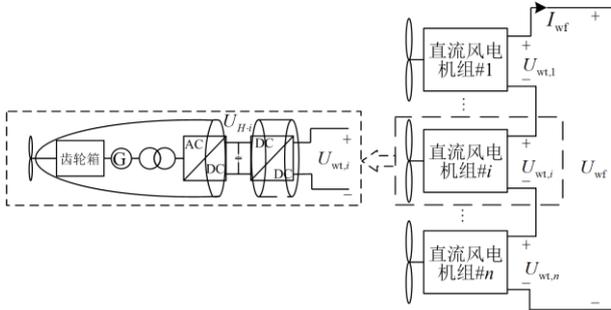


图 3 串联型全直流风电场

Fig. 3 Series-connected all-DC wind farm

串联型全直流风电场由 n 台 DCWT 串联而成,每台 DCWT 的输出功率为 $P_{wt,i}$,DCWT 出口处直流电压为 $U_{wt,i}$ 。 n 台 DCWT 通过串联连接使得风电场直流母线电压达到高压直流输电水平,风电场的直流母线电压和输出功率满足式(1)和式(2)。

$$U_{wf} = \sum_{i=1}^n U_{wt,i} \quad (1)$$

$$P_{wf} = \sum_{i=1}^n P_{wt,i} \quad (2)$$

式中: U_{wf} 为风电场的直流输电电压; P_{wf} 为整个区域风电场的总功率。

由于 DCWT 为串联连接,所以每台 DCWT 的出口电流就是风电场的直流电流,其输出功率满足

$$P_{wt,i} = U_{wt,i} I_{wf} \quad (3)$$

式中, I_{wf} 为风电场高压侧直流电流。

整个区域风电场的输出功率满足

$$P_{wf} = U_{wf} I_{wf} \quad (4)$$

结合式(3)和式(4),DCWT 的出口电压 $U_{wt,i}$ 可表示为

$$U_{wt,i} = \frac{P_{wt,i}}{P_{wf}} U_{wf} \quad (5)$$

由式(5)可知,当串联 DCWT 工作于稳态运行状态时,DCWT 的出口电压 $U_{wt,i}$ 取决于 $P_{wt,i}$ 和 P_{wf} 的比值,这反映出 DCWT 串联系统中输出功率较高的 DCWT 将具备更高的出口直流电压,反之亦然。

因此,一台 DCWT 运行工况的改变会影响到风电场中的其他 DCWT。

根据 DCWT 交流侧与直流侧满足功率平衡,DCWT 的输出功率还可以表示为

$$P_{wt,i} = \frac{3}{2} U_{p,i} I_{d,i} \quad (6)$$

式中: $U_{p,i}$ 为第 i 台 DCWT 交流侧相电压峰值; $I_{d,i}$ 为第 i 台 DCWT 交流侧三相电流的 d 轴分量。

当直流风电场中 DCWT 的输出功率发生变化时,DCWT 串联系统的动态变化过程可表示为

$$\begin{cases} P_{wt,i} + \Delta P_{wt,i} = \frac{3}{2} \cdot U_{p,i} \cdot (I_{d,i} + \Delta I_{d,i}) \\ P_{wt,i} + \Delta P_{wt,i} = (U_{wt,i} + \Delta U_{wt,i}) \cdot (I_{wf} + \Delta I_{wf}) \\ I_{wf} + \Delta I_{wf} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{wt,i} + \Delta P_{wt,i})}{U_{wf}} \\ \sum_{i=1}^n (U_{wt,i} + \Delta U_{wt,i}) = U_{wf} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta P_{wt,i}$ 为 DCWT 输出功率的变化量; $\Delta I_{d,i}$ 为 DCWT 交流侧三相电流 d 轴分量的变化量; $\Delta U_{wt,i}$ 为 DCWT 出口电压的变化量; ΔI_{wf} 为高压侧直流电流的变化量。

由式(7)可以发现,DCWT 输出功率的变化会首先影响到 DCWT 系统的交流侧电流 $I_{wt,i}$,然后影响到 DCWT 的出口电压和高压侧直流电流,DCWT 的出口电压和高压侧直流电流相互影响,通过不断循环使系统达到新的平衡点,整个过程如图 4 所示。

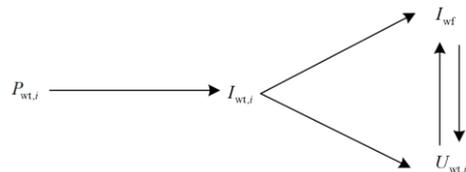


图 4 串联风电场的动态特性

Fig. 4 Dynamic characteristics of series wind farms

1.4 新型 DCWT 输出特性

与传统单台 DCWT 输出恒定的直流电压不同,单台新型 DCWT 通过 H 桥结构的 DC/DC 变换器输出两电平(0, $U_{wt,i}$)的直流电压,利用串联型全直流风电场输出电压为各新型 DCWT 输出直流电压之和的特性,通过载波移相调制,使各新型 DCWT 输出的两电平直流电压通过堆叠实现串联型全直流风电场输出恒定的高压直流电能。

新型 DCWT 基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器如图 5 所示。

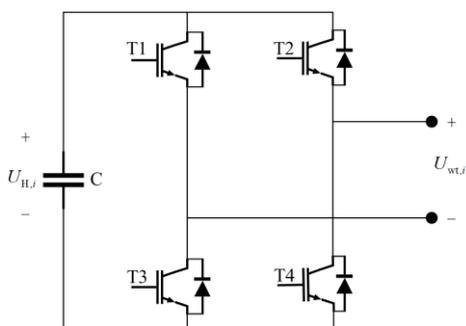


图5 新型 DCWT 的 DC/DC 变换器

Fig. 5 DC/DC converter of DCWT

DCWT 基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器有 5 种工作模式, 其开关状态如表 1 所示。

表 1 DC/DC 变换器开关状态

Table 1 Switching status of DC/DC converter

模式	T1	T2	T3	T4	I_{wf}	$U_{wt,i}$
1	1	0	0	1	—	$U_{H,i}$
2	0	1	1	0	—	$-U_{H,i}$
3	1	1	0	0	—	0
4	0	0	1	1	—	0
5	0	0	0	0	<0	$-U_{H,i}$

当 DCWT 输出功率时, 基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器工作在模式 1、3、4, 使 DCWT 输出 $U_{H,i}$ 和 0 两种电平; 当 DCWT 吸收功率时, 基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器工作在模式 2、3、4, 使 DCWT 输出 $-U_{H,i}$ 和 0 两种电平; 当直流侧发生短路故障时, 基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器工作在模式 5, 所有开关管均关断, 此时 DC/DC 变换器内电流 $I_{wf} < 0$, 使 DCWT 输出电压为 $-U_{H,i}$ 。

2 系统运行控制与管理策略

2.1 系统整体控制方案

在基于 DCWT 的串联型全直流发电系统中, DCWT 机侧 AC/DC 换流器主要控制 DCWT 的有功功率和无功功率, 保证 DCWT 的稳定运行; DCWT 机侧 DC/DC 变换器主要用于控制换流器机侧直流电压的稳定, 为调节 DCWT 出口电压提供保障; 网侧柔性直流换流器 MMC 主要负责控制高压直流母线电压稳定, 并为电网提供一定的无功功率支撑, 从而保证将风电场输出的功率全部输送至电网^[19]。基于 DCWT 的串联型全直流发电系统采用的是逐级控制, 包括系统级、控制器级以及换流器级控制, 控制框图如图 6 所示。

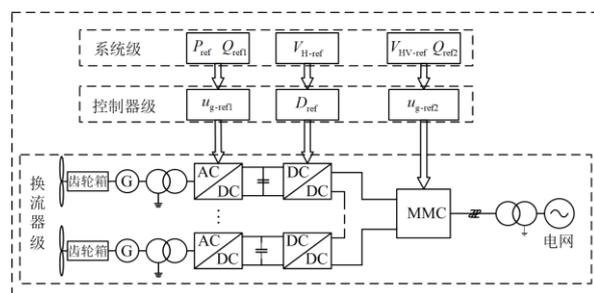


图 6 全直流发电系统控制图

Fig. 6 Control diagram of all-DC power generation system

由图 6 可知, 系统级控制层面主要负责发送顶层控制指令, 包括 DCWT 机侧的 AC/DC 换流器有功功率指令 P_{ref} 和无功功率指令 Q_{ref1} 、DCWT 的 DC/DC 变换器机侧直流侧电压指令 V_{H-ref} 、网侧 MMC 换流器的高压直流母线电压指令 V_{HV-ref} 和无功功率指令 Q_{ref2} 。控制器级控制层面主要负责将接收到的顶层控制指令通过计算转化为换流器的控制信号, 其中 DCWT 的机侧 AC/DC 控制器根据系统级的有功、无功指令计算出调制波 u_{g-ref1} , 机侧 DC/DC 控制器根据系统级的电压指令计算出占空比 D_{ref} , 网侧 MMC 控制器根据系统级的电压和无功指令计算出调制波 u_{g-ref2} 。换流器级控制层面主要负责将所接收到的上层控制信号通过相应的调制方法转换为开关脉冲信号并作用于开关管, 实现系统的稳定运行^[18]。

2.2 DCWT 控制策略

2.2.1 机侧 AC/DC 换流器控制策略

DCWT 机侧 AC/DC 换流器主要控制 DCWT 的有功功率和无功功率, 采用的是常规带前馈解耦的 $d-q$ 电流矢量控制策略, 通过控制 d 、 q 轴电流分量来实时控制 DCWT 输出的有功功率和无功功率, 并通过计算得到相应的电压调制信号 u_d 和 u_q , 将调制信号通过坐标变换得到 AC/DC 换流器开关管的三相调制信号, 再进行 PWM 调制, 从而控制 DCWT 的稳定运行, 其控制框图如图 7 所示。

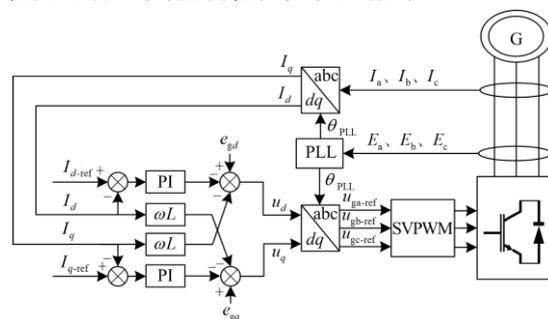


图 7 机侧 AC/DC 换流器控制策略

Fig. 7 AC/DC converter control strategy at generator side

2.2.2 机侧 H 桥 DC/DC 变换器控制策略

DCWT 机侧 DC/DC 变换器主要用于控制机侧直流电压稳定并调节 DCWT 出口电压,保障 DCWT 的安全稳定运行,采用电压闭环控制,其控制框图如图 8 所示。

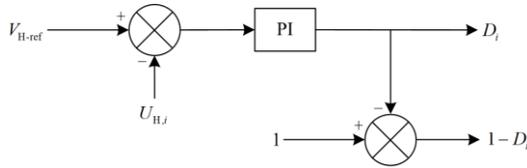


图 8 机侧 DC/DC 变换器控制策略

Fig. 8 Control strategy of generator side DC/DC converter

电压环通过将 DC/DC 变换器机侧直流电压给定值与采样值进行 PI 计算,生成两个桥臂的占空比 D_i 和 $1-D_i$, 因此 H 桥 DC/DC 变换器机侧直流电压与 DCWT 出口电压的关系为

$$U_{wt,i} = (2D_i - 1) \cdot U_{H,i} \quad (8)$$

由式(8)可知,不同的占空比 D_i 对应不同的 DCWT 出口电压,当 DCWT 输出的功率发生变化时,占空比 D_i 随之改变,从而改变 DCWT 出口电压。当占空比 D_i 满足 $0.5 < D_i < 1$ 时,DCWT 出口电压为正值,DCWT 输出功率;当占空比 D_i 满足 $0 < D_i < 0.5$ 时,DCWT 出口电压为负值,DCWT 吸收功率,从而实现能量的双向流动。

2.3 网侧 MMC 换流器控制策略

网侧 MMC 换流器主要负责控制高压直流母线电压稳定,并为电网提供一定的无功功率支撑^[20],考虑 MMC 换流器需具备直流短路故障清除能力^[21]以及在较大范围内调节直流侧母线电压的能力,故采用半桥子模块与全桥子模块相结合的混合型 MMC 换流器^[22],其控制方式为双闭环控制策略,包括电压外环和电流内环控制^[23],通过电压外环控制直流母线电压,保证系统的功率传输,使系统稳定运行。同时,电压外环的比例积分(PI)控制器的输出作为内环 d 轴电流分量的参考信号,以提升系统的动态响应速度, q 轴电流闭环控制调节系统无功功率,为将风电场的能量全部输送到网侧提供保障,控制策略如图 9 所示。

3 故障处理策略

3.1 DCWT 内部故障

当 DCWT 因控制、机械、电路或绝缘等因素产生故障时,会造成相应的 DCWT 单元退出运行,极大地威胁了 DCWT 系统的安全稳定运行,所以系统

级的运行方案要求风电场中个别 DCWT 因故障退出运行时,不能影响整个风电场的稳定运行^[18]。本文采用在 DCWT 出口处添加旁路开关使故障 DCWT 退出运行的方式提高系统的可靠性。

当 DCWT 的第 i 个单元发生故障时,DCWT 的故障投切逻辑如图 10 所示。

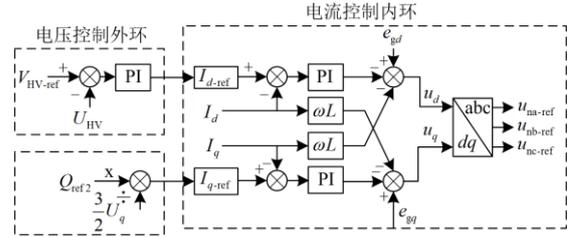


图 9 网侧 MMC 控制策略

Fig. 9 Network side MMC control strategy

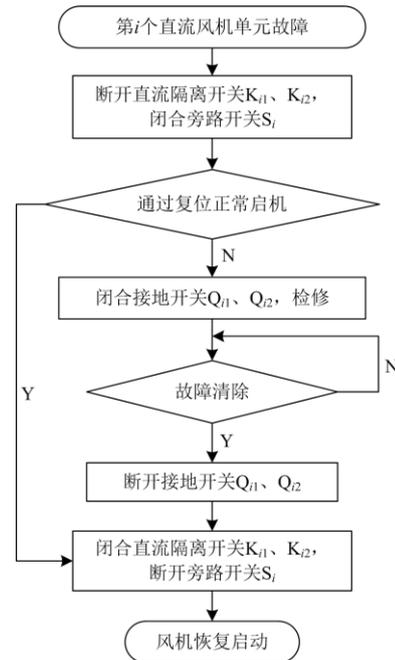


图 10 DCWT 故障的投切逻辑

Fig. 10 Switching logic of DCWT fault

当第 i 个 DCWT 发生故障时,DCWT 中相应的直流隔离开关 K_{i1} 、 K_{i2} 断开,同时闭合旁路开关 S_i 将故障 DCWT 旁路切除,此时 DCWT 内所有功率器件闭锁。若可通过复位恢复启机,则 DCWT 在闭合直流隔离开关 K_{i1} 、 K_{i2} , 断开旁路开关 S_i 后恢复启动;若无法通过复位正常启机,则需要闭合接地开关 Q_{i1} 、 Q_{i2} , 对 DCWT 电容放电后进行检修,在故障清除后再断开接地开关 Q_{i1} 、 Q_{i2} , 闭合直流隔离开关 K_{i1} 、 K_{i2} , 断开旁路开关 S_i , 使 DCWT

恢复启动。当故障 DCWT 单元恢复正常后, DCWT 可直接从网侧吸收功率实现自启动, 所以无需在机侧配置储能设备, 以此降低系统成本。

3.2 直流短路故障

直流短路故障是最严重的故障之一^[24], 对系统的危害极为严重, 系统直流侧发生短路故障后, 直流侧的故障电流上升极快, 这将严重威胁系统内部的换流器件^[25]。为避免系统中各换流器的开关管在发生直流短路故障时因过流而烧毁, 在 DCWT 内部采用基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器, 使 DCWT 具备直流侧故障自清除的能力; 网侧换流器采用半桥子模块与全桥子模块相结合的混合型 MMC 换流器, 使其具备直流短路故障自清除能力。当系统直流侧发生短路故障时, 故障电流在 DCWT 内的流通路径如图 11 所示, 故障电流在 MMC 换流器内的流通路径如图 12 所示。

由图 11 可知, 当直流侧发生短路故障时, 故障电流在 DCWT 内流动的方向是向 DCWT 直流支撑电容充电的方向, 直流支撑电容电压方向与故障电流流动方向相反, 从而驱使故障电流快速衰减到 0, DCWT 采用基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器, 当直流侧故障时只要闭锁 IGBT, 故障电流就会自动衰减到 0, 避免 DCWT 内部开关管因过流而损坏, 使 DCWT 具备直流短路故障自清除能力。

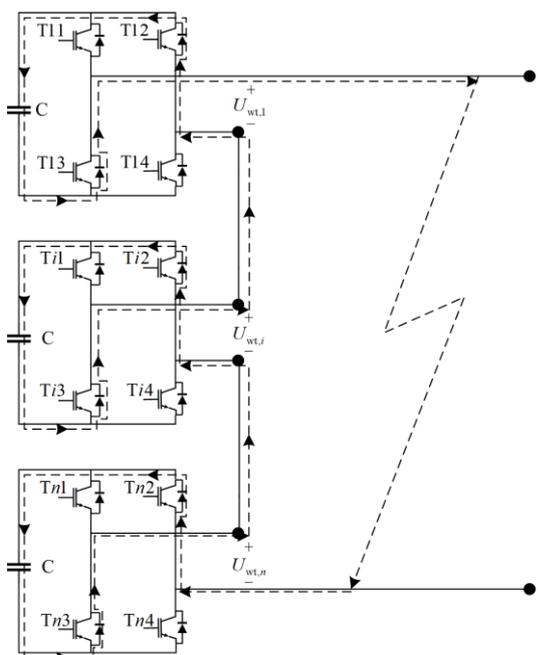


图 11 故障电流在 DCWT 内的流通路径

Fig. 11 Flow path of fault current in DCWT

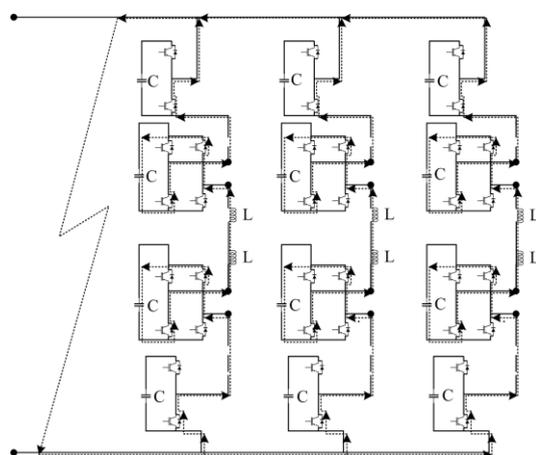


图 12 故障电流在 MMC 内的流通路径

Fig. 12 Flow path of fault current in MMC

由图 12 可知, 当直流侧发生短路故障时, MMC 换流器闭锁, 此时只有全桥子模块的电容处于投入状态, 故障电流在 MMC 换流器内流动的方向为全桥子模块电容充电的方向, 全桥子模块电容电压方向与故障电流流动的方向相反, 形成负压, 从而为放电回路提供反电势以切断故障电流, 使 MMC 换流器具备直流短路故障自清除能力。

4 仿真分析与验证

为了验证所设计的基于新型 DCWT 的串联型风电场系统方案的可行性与有效性, 本文基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了额定容量为 50 MW 的 DCWT 串联型全直流发电系统, 系统主要仿真参数如表 2 所示。

表 2 系统主要仿真参数

Table 2 Main simulation parameters of the system

参数	数值
直流风电场额定容量 P_{wf} /MW	50
DCWT 数目 n	10
DCWT 额定容量 $P_{wt,i}$ /MW	5
机侧 AC/DC 开关频率 f_w /Hz	2000
机侧 DC/DC 直流电压 $V_{H,i}$ /kV	7.6
机侧 DC/DC 开关频率 f_d /Hz	2000
风电场输出直流电压 V_{wt} /kV	± 33
网侧 AC/DC 开关频率 f_{gs} /Hz	500
网侧线电压有效值 V_{gs} /kV	35

在系统结构方面, DCWT 机侧 AC/DC 换流器采用三相两电平电压源型整流器, 机侧 DC/DC 变换器采用基于 H 桥结构的直流换流单元, 网侧 DC/AC 换流器采用三相模块化多电平变换器, 整个仿真系统如图 13 所示。

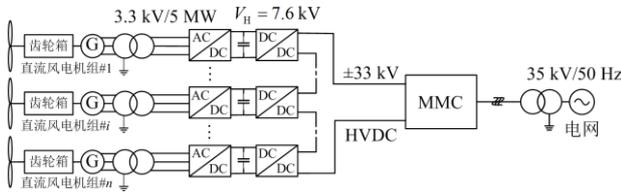


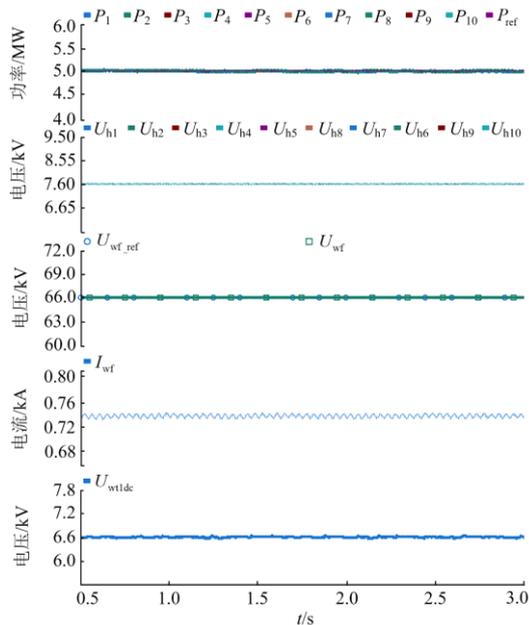
图 13 串联型全直流发电系统仿真

Fig. 13 Simulation of series-connected all-DC power generation system

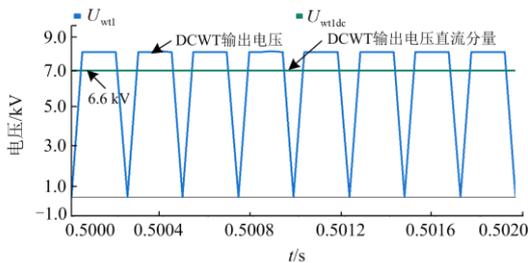
4.1 稳态运行状态

4.1.1 DCWT 输出功率均衡

图 14(a)为风电场系统内所有 DCWT 在额定运行下的系统波形图，自上而下分别为：DCWT 输出的有功功率、DC/DC 变换器机侧直流电压、高压直流母线电压、高压侧直流电流以及 DCWT 出口电压直流分量的波形图。图 14(b)为 DCWT 输出两电平电压波形图。



(a) DCWT在额定运行下的系统波形图



(b) DCWT输出两电平电压波形图

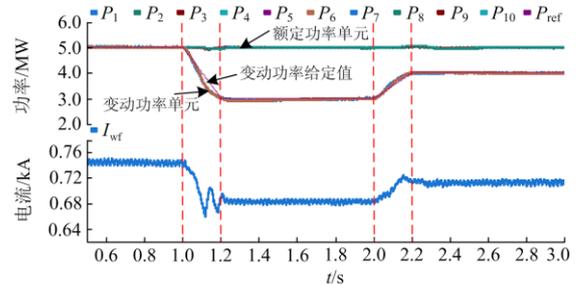
图 14 DCWT 额定运行下系统波形和输出两电平电压波形

Fig. 14 System waveform and output two-level voltage waveform under DCWT rated operation

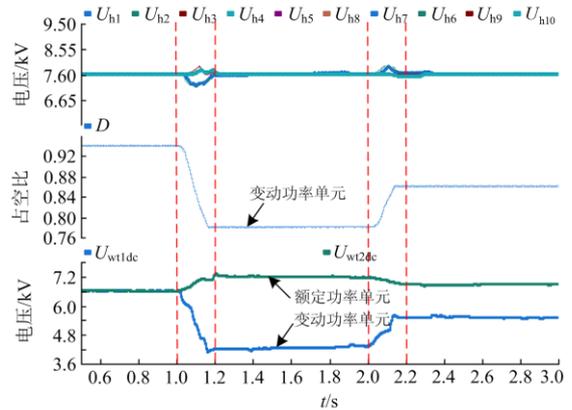
由仿真结果可知，DCWT 输出额定功率时，系统运行稳定，因 DCWT 出口电压为两电平电压，为方便分析，取其直流量表示 DCWT 的输出特性。

4.1.2 DCWT 输出功率不均衡

图 15(a)给出了风电场内 2 台(1 号和 6 号)DCWT 的输出功率在 1 s 时额定功率由 5 MW 变为 3 MW，在 2 s 时额定功率由 3 MW 变为 4 MW 的系统波形图；图 15(b)给出了该工况下 DC/DC 变换器机侧直流电压、1 号 DCWT 的 DC/DC 变换器占空比以及 1 号和 2 号 DCWT 出口电压直流分量的波形图。



(a) DCWT额定输出波形图



(b) DWT内DC1DC变换器的输出波形图

图 15 DCWT 输出功率不均衡时系统波形

Fig. 15 System waveform when the output power of DCWT is unbalanced

由仿真结果可知，当 DCWT 输出功率降低时，DCWT 出口电压和高压侧直流电流随之降低，并通过不断循环最终达到新的平衡，与 DCWT 串联型全直流风电场的动态特性相符，但 DCWT 功率的变化并不会导致 DCWT 的 DC/DC 变换器机侧直流电压的偏移，其电压在发生短暂波动后再次恢复至额定值。当 DCWT 输出功率发生变化时，通过调节 DCWT 内部 DC/DC 变换器的占空比可以有效控制各 DCWT 的出口电压，进而实现风电场输出电压的稳定控制。

该系统方案能够在 DCWT 因风速或控制等原

因导致输出功率发生变动、系统内各 DCWT 输出功率不均衡时维持系统的安全稳定运行, 且能够随 DCWT 输出功率的变动将所有 DCWT 的输出功率全部送出。

4.1.3 高压直流母线电压波动

图 16(a)给出了在 1 s 时高压直流母线电压由 66 kV 下降到 60 kV, 又在 2 s 时升高到 72 kV 时高压直流母线电压、DCWT 出口电压直流分量及高压侧直流电流的波形图; 图 16(b)给出了该工况下 DCWT 输出功率与 DC/DC 变换器机侧直流电压的波形图。

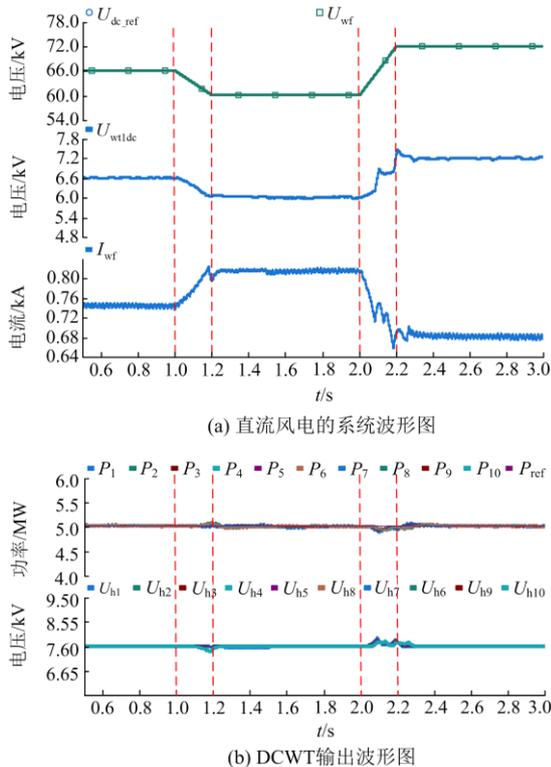


图 16 高压直流母线电压波动时的系统波形图

Fig. 16 System waveform diagram of high voltage DC bus voltage fluctuation

由仿真结果可知, 当高压直流母线电压降低时, DCWT 出口电压的直流分量随之降低, 而高压侧直流电流将逐渐升高以保证系统额定的功率传输, 反之亦然。但无论高压直流母线电压升高还是降低, DCWT 输出的有功功率和 DCWT 的 DC/DC 变换器直流侧电压在短暂波动后均能快速恢复至额定值, 从而保证了 DCWT 串联型风电场的稳定运行。

仿真结果表明, 该系统方案能够在高压直流母线电压发生变动时保证系统的稳定运行, 因此, 当 DCWT 输出功率发生变动导致风电场输出功率发生变化时, 可以通过调节高压直流母线的电压实现

对风电场最大功率运行点的跟踪。

4.2 故障运行状态

图 17 给出了当风电场中 1 号 DCWT 因发生故障而被切出, 以及故障恢复后该 DCWT 重新投入运行时的系统波形图, 自上而下分别为: DCWT 输出功率、DC/DC 变换器机侧直流电压、正常运行 DCWT 的 DC/DC 变换器占空比、DCWT 输出电压直流分量以及高压侧直流电流波形图。

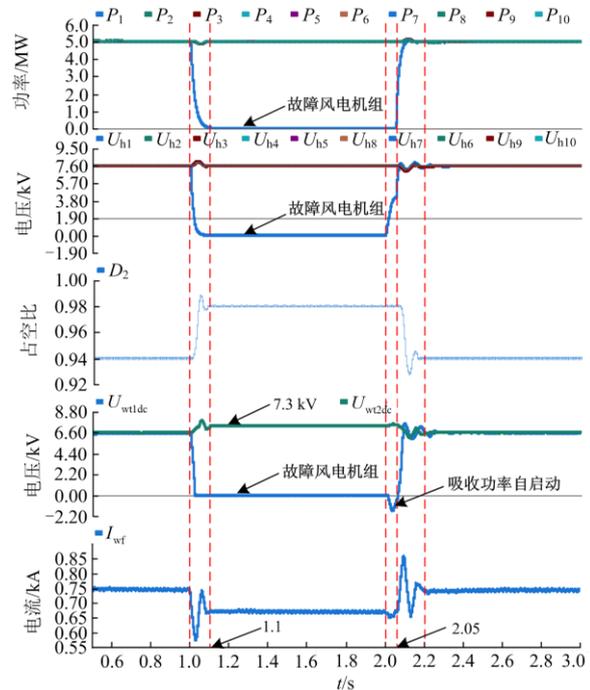


图 17 DCWT 故障运行状态时的系统波形

Fig. 17 System waveform in fault operation state of DCWT

由仿真结果可知: 1) 在 1 s 之前, 所有 DCWT 运行在额定状态, 输出功率均为 5 MW, DC/DC 变换器机侧直流电压均为 7.6 kV, DCWT 输出电压直流分量为 6.6 kV。2) 在 1 s 时, 1 号 DCWT 发生故障, 旁路开关动作将其旁路, 并闭锁该 DCWT 内所有开关管, 此时 DC/DC 变换器机侧直流电压因直流支撑电容放电降为 0, 使 DCWT 的输出电压和输出功率降为 0, 因故障 DCWT 被切出, 使风电系统向电网输送的电能下降, 从而导致高压侧直流电流下降。其余正常运行的 DCWT 的输出功率与 DC/DC 变换器机侧直流电压经短暂波动后恢复至额定值, 但 1 号 DCWT 的旁路导致其他正常运行 DCWT 出口电压提高, 通过提高 DC/DC 变换器的占空比将各正常运行 DCWT 的输出电压由 6.6 kV 提高到 7.3 kV, 维持直流风电场稳定运行; 3) 在 2 s 时, 1 号 DCWT 恢复正常并重新投入运行, 首先旁路开关断开并解锁 DC/DC 变换器的开关管, 使直流支撑

电容建立电压, 吸收功率实现自启动, 在 0.05 s 后解锁 AC/DC 换流器的开关管, 使 1 号 DCWT 恢复正常运行, 同时使所有 DCWT 出口电压恢复至额定值。

5 结论

本文提出了一种新型 DCWT 拓扑, 并以串联的形式组建风电全直流发电系统, 分析了基于 DCWT 的串联型全直流发电系统的结构、运行特性以及故障处理能力, 最后基于 PSCAD/EMTDC 搭建 50 MW 的 DCWT 串联型全直流发电系统进行仿真验证, 理论分析和仿真结果表明:

1) 本文提出的 DCWT 具备高压绝缘隔离、能量双向流动以及直流短路故障自清除的能力, 当 DCWT 发生故障时, 旁路开关与直流隔离开关可实现故障 DCWT 的快速隔离, 保证系统的稳定运行; 当直流侧发生短路故障时, DCWT 内基于 H 桥结构的 DC/DC 变换器能够将故障电流快速衰减到 0, 避免 DCWT 内部开关管因过流而损坏。

2) 基于 DCWT 的串联型全直流发电系统能够在 DCWT 输出功率均衡、输出功率不均衡、高压直流母线电压波动等稳态运行状态以及故障 DCWT 动态切入切出等故障运行状态, 可实现 DCWT 输出功率的无损耗传输以及故障 DCWT 的动态切入切出, 在满足系统灵活运行的同时提高了系统的运行可靠性。

本文提出的基于新型 DCWT 的串联型全直流发电系统不仅适用于海上风电场的场景, 而且适用于陆上风电场的场景, 有益于未来风电全直流发电系统的实现。实现直流电压传输等级提升后的风电全直流发电系统设计, 以及带有海上换流平台的远海大容量风电场的设计是下一步的研究方向。

参考文献

[1] 付艳, 周晓风, 戴国安, 等. 海上风电直流耗能装置和保护配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 178-186.
 FU Yan, ZHOU Xiaofeng, DAI Guo'an, et al. Research on coordination strategy for an offshore wind power DC chopper device and protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 178-186.

[2] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.
 ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J].

Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.

[3] 张静, 高冲, 许彬, 等. 海上风电直流并网工程用新型柔性直流耗能装置电气设计研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4081-4091.
 ZHANG Jing, GAO Chong, XU Bin, et al. Research on electrical design of novel flexible DC energy consuming device for offshore wind power DC grid connection project[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4081-4091.

[4] 施刚, 王志冰, 曹远志, 等. 适用于高压直流传输的海上直流风电场内网拓扑的比较分析[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3059-3064.
 SHI Gang, WANG Zhibing, CAO Yuanzhi, et al. Comparative analysis of internal grid topology of offshore DC wind farm suitable for HVDC transmission[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3059-3064.

[5] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
 WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.

[6] 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.

[7] 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.
 JIANG Daozhuo, GU Hongjie, YIN Rui, et al. Research status and developing prospect of offshore wind farm with pure DC systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2424-2431.

[8] 王常骐, 郭家虎. 风电场直流并网的拓扑结构研究[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3065-3070.
 WANG Changqi, GUO Jiahu. Research on topological structures for DC grid-connection of wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3065-3070.

[9] 魏晓光, 王新颖, 高冲, 等. 用于直流电网的高压大容量 DC/DC 变换器拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊 1): 218-224.
 WEI Xiaoguang, WANG Xinying, GAO Chong, et al. Topologies research of high voltage and high power DC/DC converters used in DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 218-224.

[10] 郭灵瑜, 姚钢, 周荔丹, 等. 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, et al. 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.
- [11] GUO G, 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.
- [12] 蔡旭, 杨仁炳, 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.
- [13] GUAN M. 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.
- [14] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.
- SUN Ruijuan, LIANG Jun, WANG Kewen, et al. Overview of offshore wind power collection system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 105-115.
- [15] 李翔宇, GAYAN A, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.
- LI Xiangyu, GAYAN A, YAO Liangzhong, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116-126.
- [16] 姚良忠, 施刚, 曹远志, 等. 海上直流风电场内网中串联直流风机的变速控制[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2410-2415.
- YAO Liangzhong, SHI Gang, CAO Yuanzhi, et al. Variable speed control of series-connected DC wind turbines in the internal grid of offshore DC wind farm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2410-2415.
- [17] RONG F, WU G, 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.
- [18] 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.
- [19] 薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 等. 大规模海上风电场的双层分布式有功控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 1-9.
- XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 1-9.
- [20] AZAB M. High performance decoupled active and reactive power control for three-phase grid-tied inverters using model predictive control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-19.
- [21] HE J, CHEN K, LI M, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-15.
- [22] 邓帅荣, 周念成, 王月月, 等. 基于混合型 MMC 全桥子模块比例的直流侧故障隔离电压研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3250-3257.
- ZHENG Shuirong, ZHOU Niancheng, WANG Yueyue, et al. Research on DC fault isolation voltage based on proportions of full bridge sub-modules of hybrid MMC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3250-3257.
- [23] ZHANG H, BELHAOUANE M, COLAS F, et al. On comprehensive description and analysis of MMC control design: simulation and experimental study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(1): 244-253.
- [24] 王思华, 赵磊, 王军军, 等. 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 9-17.
- WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 9-17.
- [25] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.

收稿日期: 2021-12-14; 修回日期: 2022-02-13

作者简介:

王祥君(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电全直流发电系统设计; E-mail:972006986@qq.com

李战龙(1978—), 男, 硕士, 研究方向为柔性直流输电技术、风电场系统; E-mail: lizhanlong@goldwind.com.cn

王海云(1973—), 女, 通信作者, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术。E-mail: 327028229@qq.com

(编辑 姜新丽)