

DOI: 10.7667/PSPC180511

含风电的真双极混合型 MMC-MTDC 系统故障 穿越及能量耗散控制

曹帅¹, 向往¹, 林卫星², 文劲宇¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;
2. 特变电工新疆新能源股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 为解决柔性直流电网的故障问题, 采用混合型模块化多电平换流器搭建双极四端直流电网。设计了单极换流器故障及直流线路故障无闭锁运行策略。系统无闭锁运行期间并网点交流电压稳定, 风机可维持正常运行。考虑到故障期间风机持续并网输出功率, 根据风电场出力设计了耗散电阻自适应分级投入策略, 通过与风机内部的斩波电阻的配合, 耗散掉多余的能量。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 的多组仿真, 验证了混合型柔性直流电网的故障无闭锁运行及能量耗散的有效性。

关键词: 混合型 MMC; 真双极 MTDC 风电并网; 换流器退出运行; 直流故障穿越; 分级能量耗散

Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms

CAO Shuai¹, XIANG Wang¹, LIN Weixing², WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. TBEA SunOasis Co., Ltd, Urumchi 830011, China)

Abstract: To solve the faults in high-voltage direct current grid (HVDC grid), hybrid Modular Multilevel Converter (MMC) is adopted to set up a bipolar four-terminal DC grid. The MMC non-blocking operation strategies of unipolar converter fault and DC line fault are designed. During the fault operation, the AC voltage at the grid-connection point is stable and the wind turbine can maintain normal operation. Considering the continuous output wind power in the fault period, an adaptive step-by-step control strategy of dissipative resistance is designed, taking the output wind power as criteria. The excess energy is dissipated by cooperating with the dissipation resistance and chopper resistance inside the direct-drive wind turbine. Finally, the simulation based on PSCAD/EMTDC platform verifies the MMC unblocking fault ride-through operation of hybrid MTDC grid and proves the effectiveness of its fault energy dissipation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Operation Characteristics and Control Technology of ± 500 kV HVDC Grid".

Key words: hybrid MMC; real bipolar MTDC integrating wind power; converter out of operation; DC fault ride-through; graded energy dissipation

0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 具有有功无功控制解耦、可连接无

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2018YFB0904600); 国家电网公司科技项目资助 "±500 kV 柔性直流电网运行特性与控制技术研究"

源网络等多方面的技术优势, 近年来被广泛应用于大规模风电远距离电能输送的场合^[1-2]。随着经济发展和大规模风电并网的发展, 传统的点对点功率传输形式已不能满足区域电网互联的需求, 采用 MMC 构建柔性直流电网能够实现不同地区的风电场和电网互联, 具有广阔的应用前景^[3-5]。

远距离直流电网需采用架空线路进行传输, 由于架空线路故障率高, 直流故障是不能忽视的问题^[6]。

为应对直流线路短路故障,可采用高压大容量直流断路器(DC Circuit Breaker, DCCB)快速隔离故障线路。例如我国正在建设的张北柔性直流电网工程即采用了混合式直流断路器与半桥型 MMC 构建直流电网的技术方案^[7]。然而 DCCB 造价昂贵,且运行可靠性尚待工程验证。为降低直流电网对昂贵 DCCB 的依赖,充分发挥换流器拓扑的优势及其控制能力进行故障限流成为重要的技术选择^[8]。

由半桥子模块(Half Bridge Sub-Module, HBSM)和全桥子模块(Full Bridge Sub-Module, FBSM)组成的混合型 MMC 具备无闭锁直流故障穿越能力,在故障期间能够持续为风机提供交流电压支撑,因此采用混合型 MMC 构建柔性直流电网可以有效应对电网的故障问题^[9-10]。然而现有文献均关注于混合型 MMC 的本身研究,例如文献[11]研究了混合型 MMC 的子模块配置比例及直流故障穿越控制策略,文献[12]研究了双极短路故障穿越,文献[13]研究了单极接地短路故障穿越。但其结构仅为点对点系统,并未考虑直流电网下的故障穿越控制,特别是含风电并网的 MMC-MTDC 系统的故障穿越。

另一方面,上述研究均是针对伪双极系统,一旦某极发生故障,整个系统将停运,运行可靠性不高。采用真双极接线方式是提高供电可靠性的重要手段。文献[14]研究了真双极结构的控制运行方法,其正负极完全独立,在单极发生故障时非故障极依然可以传输功率。但其系统仍为点对点输电结构,未考虑多端直流输电以及直流电网系统的运行策略甚至故障穿越控制。文献[15]针对张北真双极四端直流环网,分析了受端换流器退出运行的功率转代策略,但若送端换流器退出运行,风电功率将全部转到非故障极换流器中,单纯依靠功率转代策略将无法保证送端换流器的安全。因此,需研究含风电真双极型直流电网的故障穿越控制及能量耗散方案,避免在交直流故障等工况下,风电功率无法耗散导致换流站子模块电容过电压乃至电网崩溃的问题^[16]。采用耗散装置吸收故障期间风电的过剩能量是一种经济有效的方案。耗散装置装设的位置对其阻值大小、能量吸收效果和成本有较大影响。文献[17]提出了在子模块增加耗散电阻的方案,该方案增加了子模块设计的复杂度,提高了制造成本,且易使子模块发热过高;文献[18]在直流线路上并联耗散电阻,但其所需电阻阻值过大,制造难度大,且成本较高。

为解决上述问题,本文针对基于混合型 MMC 的含风电双极柔性直流电网,设计了无闭锁故障穿越控制策略,提出了在风场侧 MMC 交流出口装设

耗散电阻吸收故障能量的方法。针对换流器退出运行、直流故障等工况,在混合型 MMC 故障穿越控制的基础上,分析了耗散电阻的设计原则,设计了耗散电阻的分组投入策略。在故障恢复期间,提出了在风机内部装设斩波电阻(DC Chopper)平抑瞬时功率冲击,与耗散电阻协同配合,实现系统功率传输的安全快速恢复。最后,通过 PSCAD 下的仿真,验证了所述风电柔直电网的故障运行控制的有效性。

1 双极混合型 MMC-MTDC 风电并网拓扑

图 1 所示为真双极四端柔直风电并网系统拓扑,其中风电场 1 为 1 500 MW 的直驱式风电场,风电场 2 和 3 为两个 1 500 MW 的直驱式风电场。风电场出口电压均为 138 kV,经升压变压器至 230 kV,其中风电场 1 连接风场侧 MMC2(Wind farm side MMC2, WFMMC2),风电场 2 和 3 连接 WFMMC1。WFMMC 与电网侧 MMC(Grid side MMC, GSMC)通过架空线构成双极直流环网。

其中换流器均采用如图 1 下方所示的混合型 MMC 拓扑,每个桥臂由 HBSM、FBSM 及桥臂电感组成,其中 HBSM 与 FBSM 比例相等。HBSM 有投入和切除两种状态,分别输出电压 $+U_c$ 和 0;FBSM 有投入、切除、负投入三种状态,分别输出电压 $+U_c$ 、0 和 $-U_c$ 。因此混合型 MMC 通过负投入 FBSM 降低直流电压,能够在零直流电压下运行,通过调节控制器参数实现无闭锁直流故障穿越^[19]。

图 1 每条线路两端均装设直流断路器,方便进行线路检修或隔离。耗散电阻(R_1)可采用多个电阻串联或并联的方式组合构成(本文采取并联方式),并联在风电场侧换流站的交流侧,吸收故障期间的风电能量。斩波电阻(R_2)装设在每个风电场全功率变流器(Full Power Converter, FPC)直流联络线正负极之间,保证电网在故障恢复阶段的安全运行。通过与耗散电阻 R_1 的配合,实现直流电网故障无闭锁运行过程中的能量协同耗散。 F_1 、 F_2 分别为直流线路故障和单极换流器故障,后文中详细介绍。

2 真双极混合型 MTDC 风电并网系统的运行控制策略

在真双极混合型 MTDC 风电并网系统中,按照风功率产生到输送的角度进行分类,其控制结构可分为风电场、风场侧换流站、电网侧换流站三类。

2.1 直驱式风电场控制

在永磁同步直驱式风机中,风力机通过桨距角控制获得最佳的功率系数,结合功率曲线法实现最

大功率跟踪^[20]。FPC 由两个 MMC 背靠背组成, 其机侧 MMC 采用定功率控制, 通过调整功率指令值可以实现不同功率的输出; 其网侧 MMC 采用定直

流电压控制, 从而输出稳定电网频率的风电功率, 如图 2 中风电场控制所示。

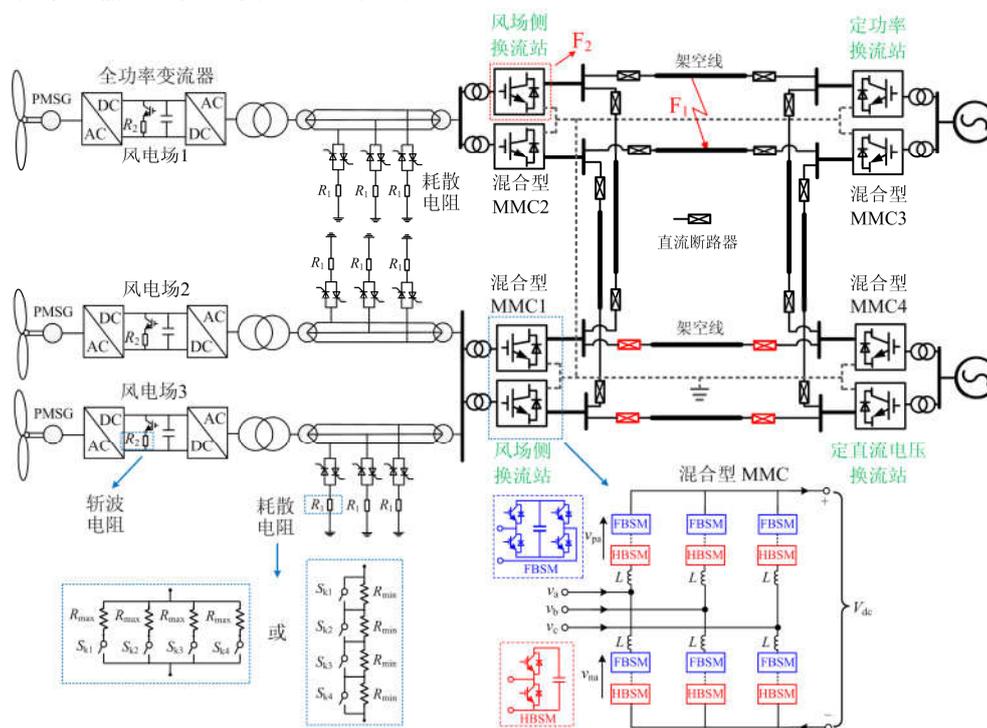


图 1 真双极 MMC-MTDC 风电并网拓扑

Fig. 1 Structure of real bipolar MMC-MTDC grid integrating wind farms

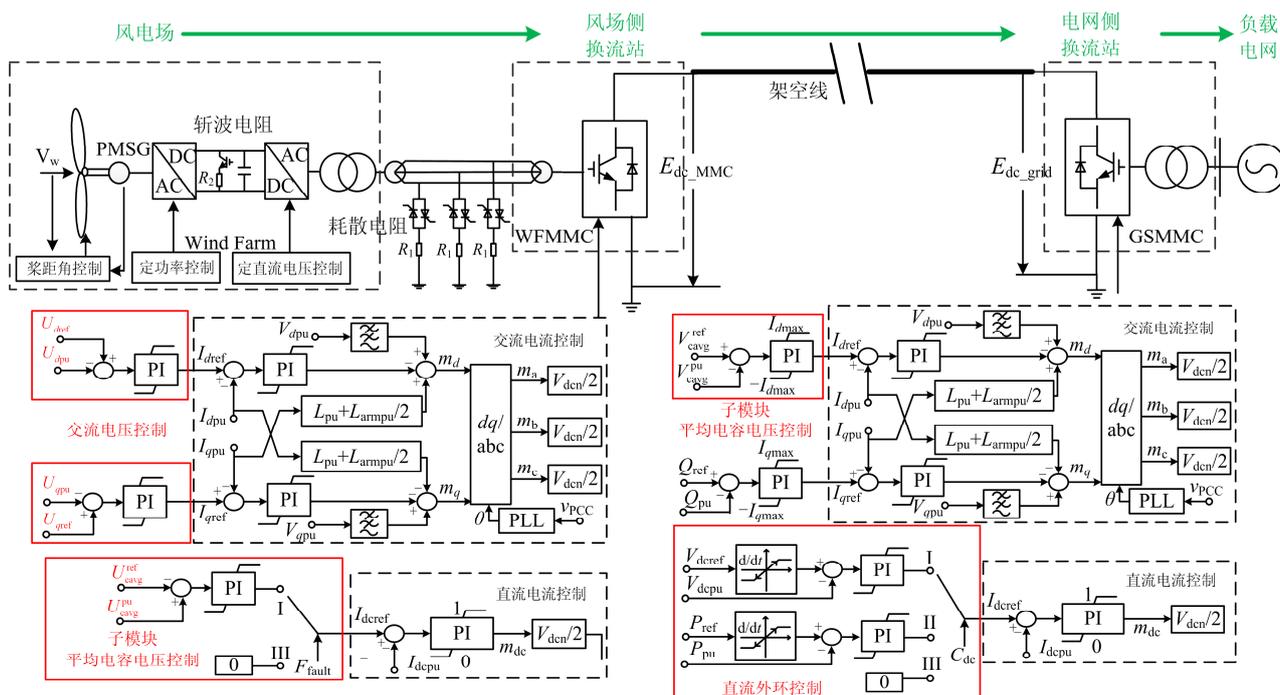


图 2 混合型 MTDC 风电并网系统的控制结构

Fig. 2 Control structure of hybrid MTDC integrating wind power system

2.2 风场侧换流站控制

风场侧混合型 MMC 的控制结构如图 2 中左下方所示。由交流控制回路和直流控制回路组成。其中, 交流控制回路用于控制风电并网点的电压频率和幅值为恒定; 直流控制回路用于控制混合型 MMC 的子模块平均电容电压^[10]。

由于 WFMMC 采用双极结构, 其交流侧连接同一风电并网母线, 若正负极 MMC 同时采取定交流电压控制, 则可能出现控制紊乱, 因此需要考虑极间换流器协调控制。令其中某极换流器为主换流器, 交流侧采用定交流电压控制稳定并网点电压; 另一极为副换流器, 其交流电流参考值直接采取主换流器 I_{dref} , 并通过 PLL 锁相环节与并网点电压保持一致。

2.3 电网侧换流站控制

GSMC 主要承担以下任务: 1) 控制直流电压稳定; 2) 消纳风电功率。因此电网侧两个换流站分别采用定直流电压控制和定有功功率控制, 如图 2 右侧下方 GSMC 控制所示。二者交流外环控制模式相同, 均采用子模块平均电容电压控制能量均衡; 直流外环控制中, 定直流电压站采用方式 I 使直流电压跟踪稳定, 定有功功率站采用方式 II 使换流站功率恒定, GSMC 的交直流控制器方程为

$$\begin{cases} I_{dref} = K_{aco_p}(U_{cavg}^{ref} - U_{cavg}^{pu}) + K_{aco_i} \int (U_{cavg}^{ref} - U_{cavg}^{pu}) dt \\ m_d = K_{aci_p}(I_{dref} - I_{dpu}) + K_{aci_i} \int (I_{dref} - I_{dpu}) dt \\ I_{dref1} = K_{dco_p}(U_{dref} - U_{dcpu}) + K_{dco_i} \int (U_{dref} - U_{dcpu}) dt \\ I_{dref2} = K_{dco_p}(P_{ref} - P_{pu}) + K_{dco_i} \int (P_{ref} - P_{pu}) dt \\ m_{dc} = K_{dci_p}(I_{dref} - I_{dcpu}) + K_{dci_i} \int (I_{dref} - I_{dcpu}) dt \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: U_{dref} 、 U_{dpu} 为交流电压参考值和实际值; I_{dref} 、 I_{dpu} 是交流电流参考值和实际值; K_{aco_p} 和 K_{aco_i} 为交流外环 PI 控制器的参数; K_{aci_p} 和 K_{aci_i} 为交流内环 PI 控制器的参数; m_d 为交流调制比的 d 轴分量。在直流控制环中, U_{cavg}^{ref} 、 U_{cavg}^{pu} 为子模块平均电容电压参考值和实际值; I_{dref} 、 I_{dcpu} 是直流电流参考值和实际值; K_{dco_p} 和 K_{dco_i} 为直流外环 PI 控制器的参数; K_{dci_p} 和 K_{dci_i} 为直流内环 PI 控制器的参数; m_{dc} 为直流调制比。

3 耗散装置的设计与控制

3.1 耗散电阻与斩波电阻的设计

当系统发生直流故障时, 尽管混合型 MMC 通过控制可以使系统无闭锁穿越故障, 但故障期间风

电功率无法正常输送, 过剩的能量将灌注到换流器或直流线路中, 导致其电压超过耐压范围, 危害整个系统的安全。为使故障期间系统能够正常运行, 采用耗散电阻吸收故障期间的过剩风电功率是一种有效的应对方法。由于混合型 MMC 可以在故障期间维持并网点交流电压, 因此本文提出了在 WFMMC 交流三相出口并联耗散电阻, 其装设位置如图 1 中 R_1 所示。 R_1 由 4 组串联晶闸管开关 $S_{ki}(i=1,2,3,4)$ 控制通断的电阻器 R_{max} 并联构成, 其阻值可根据风场出力不同灵活调节。由于耗散电阻与交流母线相连, 需满足双向导通性, 且工程要求其投入导通时间需小于 0.6 ms, 退出响应时间不超过 10 ms, 因此采用反并联的快速晶闸管控制满足需求^[21]。

在本文研究单个汇集风电场 1500 MW, 并网点电压 230 kV 系统中, 考虑风电场不同等级的出力情况, 为了使耗散电阻在充分吸收风电功率的前提下, 系统依然能够尽可能输送功率, 提出了耗散电阻自适应分组投切策略以满足不同风电出力需求。设风电场额定出力为 P_N , 实际运行中风电场出力为 $\rho P_N(0 \leq \rho \leq 1)$, 结合图 1 考虑以下两种情况。

1) 直流线路故障: MMC1 与 MMC4 直流线路检修期间, MMC2 与 MMC3 直流线路发生双极短路故障, 如图 1 中 F_1 所示。

发生线路故障时, 由于功率传输路径完全中断, 因此耗散电阻需吸收故障期间全部的风电功率。故障期间并网点电压恒定, 因此耗散电阻越小则吸收功率越多, 要想完全吸收风电功率, 其所需阻值不超过

$$R_{abs1} = \frac{U_{an}^2}{\rho P_N / 3} = \frac{U_{ac}^2}{\rho P_N} \quad (2)$$

2) 送端换流器故障: 正常运行时, MMC2 正极换流器故障, 退出运行, 如图 1 中 F_2 所示。

发生换流器故障时, 正极换流器退出运行, 倘若没有能量耗散措施, 原先正极换流器的功率全部灌注到负极换流器中, 导致非故障极换流器崩溃, 进而引发风机和系统的连锁反应。

对于送端单极换流器故障, 根据风电场不同出力设置不同耗散策略。若 $\rho < 0.5$, 则其原先所承载的功率将自然转代到负极, 耗散电阻无需投入; 若 $0.5 < \rho < 1$, 则耗散电阻需考虑按照换流站最大功率转代 750 MW 吸收多余的功率, 同理可得所需阻值不超过

$$R_{abs2} = \frac{U_{an}^2}{(\rho - 0.5)P_N / 3} = \frac{U_{ac}^2}{(\rho - 0.5)P_N} \quad (3)$$

取 $0.5 \leq \rho < 1$ 的上下边界和其等分点(0.5, 0.75, 1)分别代入式(2)、式(3)得

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{abs1}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{P_{\text{N}}} = 35 \Omega \\ R_{\text{abs2}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{0.5P_{\text{N}}} = 70 \Omega \end{array} \right. (\rho=1) \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{abs1}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{0.75P_{\text{N}}} = 47 \Omega \\ R_{\text{abs2}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{0.25P_{\text{N}}} = 140 \Omega \end{array} \right. (\rho=0.75) \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{abs1}} = \frac{U_{\text{ac}}^2}{0.5P_{\text{N}}} = 70 \Omega \\ R_{\text{abs2}} = \infty \end{array} \right. (\rho=0.5) \quad (6)$$

根据式(4)~式(6)选定每组交流耗散电阻额定耗散功率 375 MW, 耗散电阻由 4 组可控制通断的 140 Ω 电阻器并联组成。设计表 1 所示耗散电阻分级投入策略, 从而满足不同风电场出力对于故障期间能量耗散的需求, 表 1 中的 1 组指交流侧三相均投入 140 Ω 耗散电阻。

表 1 耗散电阻分级投入策略

Table 1 Classification input strategy of dissipative resistance

ρ	投入组数及最大耗散功率	
$(\rho=P_{\text{out}}/P_{\text{N}})$	直流线路故障	送端换流器故障
$\rho < 0.5$	2 组, 750 MW	不投入
$\rho = 0.5$	2 组, 750 MW	不投入
$0.5 < \rho < 0.75$	3 组, 1 125 MW	1 组, 375 MW
$0.75 \leq \rho \leq 1$	4 组, 1 500 MW	2 组, 750 MW

对于瞬时性直流短路故障而言, 耗散电阻仅能够保证故障期间换流器和风机的安全运行。在故障恢复期间, 风功率全部通过 WFMMC 外送, 系统直流电压会出现短暂过压(高于 1.2 p.u.)。若要实现系统功率的安全快速恢复, 需在全功率变流器直流联络线极间装设斩波电阻 R_2 。斩波电阻通过限制风机直流电压确保风电功率能够平缓送出, 其消耗较少能量。由于其装设在风机内部的直流联络线正负极间, 仅需单向导通, 但采用占空比投切方式对动作速率需求较高, 因此采用 IGBT 控制开通^[22]。斩波电阻体积和吸收功率较小, 在本文的等效 1 500 MW 风电场中, 参考对应容量和电压等级, 斩波电阻选为 3~6 Ω ^[23]。

3.2 耗散电阻与斩波电阻的控制策略

耗散电阻与斩波电阻的配合控制策略如图 3 所示。 U_{dcpu} 和 U_{dcmin} 分别为四端柔直电网的直流电压实际运行值与下限阈值(标么值), B_{as} 为控制耗散电

阻投入的晶闸管触发信号, $S_{\text{k Control}}$ 为耗散电阻分级投入控制器, $S_{\text{k}i}(i=1,2,3,4)$ 为与电阻 R_{max} 串联开关的控制信号, $U_{\text{dcpu_fpc}}$ 和 U_{clim} 分别为 FPC 的直流电压实际值与上限阈值, S_{cp} 为斩波电阻的投切信号。

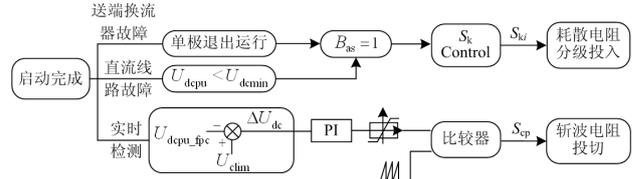


图 3 耗散电阻与斩波电阻的控制策略

Fig. 3 Control strategy of dissipation resistor and DC chopper

1) 检测换流器运行状态, 当发生故障时, 上级系统下发换流站退出指令, 并触发控制耗散电阻的反并联晶闸管导通, 根据风电出力情况选择耗散电阻分级耗散。

2) 检测 WFMMC 的直流电压标么值与下限阈值进行比较, 发生直流线路短路故障时, 直流电压迅速跌落, 当检测到其标么值 U_{dcpu} 低于 U_{dcmin} (0.9 p.u.)时, 比较器输出投切信号触发晶闸管导通, 此时耗散电阻投入。根据风电出力对于功率耗散的需求, 选择相应的耗散电阻大小。

3) 实时检测 FPC 的直流电压, 当其超过上限阈值 U_{clim} (1.1 p.u.)时, 通过 PI 控制器及迟滞比较环节输出 IGBT 导通信号, 将多余的电能通过 R_2 消耗掉, 从而使直流侧不过压, 风功率平稳输出。选取阈值应注意避开电压正常运行的波动范围, 以免造成控制器的误动作。

4 系统故障运行策略

通过耗散电阻与斩波电阻的协同耗散, 能够保证无论在换流器故障还是线路故障时均不会危害系统的安全, 由图 3 可知故障期间耗散电阻和斩波电阻的投切仅需要检测本地信号, 不依赖于换流站间的通信。故障期间换流站采取相应的控制措施, 能够实现系统的无闭锁运行, 且故障期间风机可以维持正常运行。下面将分别对换流器故障和线路故障的运行控制进行分析。

4.1 送端单极换流器(MMC2 正极)故障

MMC1 交流侧汇集 2 个风电场, MMC2 交流侧汇集 1 个风电场, 以最严重情况下单极换流器故障为例, 风电场均发出额定功率 1 500 MW, 各换流站正常运行时功率分配如图 4(a)所示: WFMMC1 正负极上网功率参考值均为 1 500 MW; WFMMC2 正负极上网功率参考值均为 750 MW; GSMC3 为定功率控制, 正负极下网功率参考值均为 750 MW; GSMC4 为定直流电

压控制，正负极下网功率参考值均为 1 500 MW。

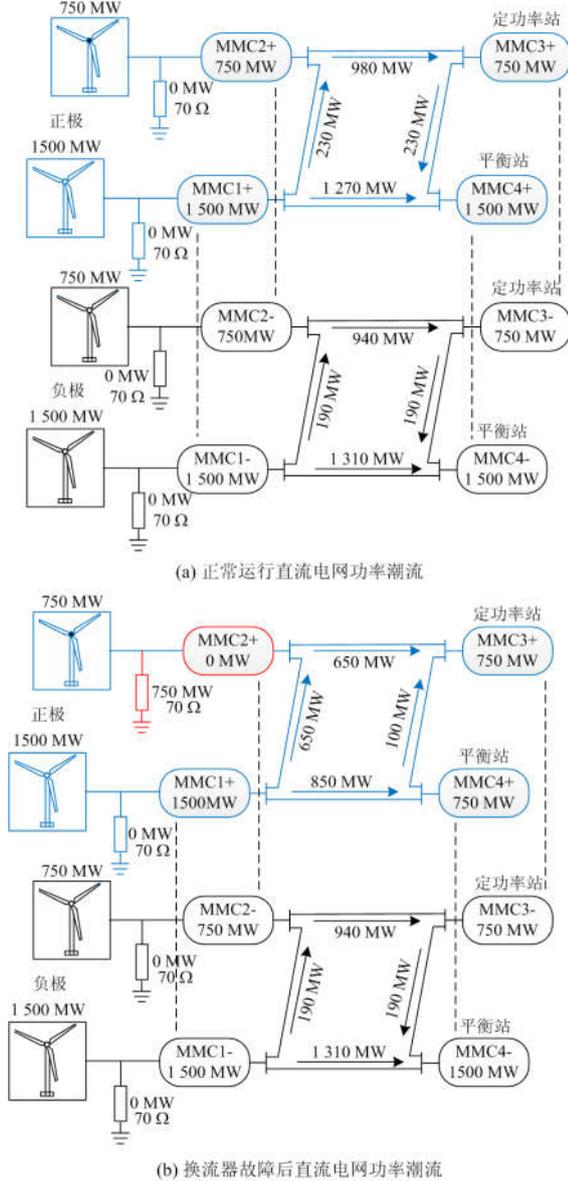


图 4 换流器故障前后直流电网功率潮流分布
Fig. 4 Power flow distribution in DC grid before and after converter fault

当 MMC2 正极换流器发生故障时，系统下发指令使正极换流器退出运行，此时耗散电阻投入 70 Ω，吸收原先正极换流器承担的 750 MW 风电功率，正极直流电网可视作三端环网运行，其中定功率 MMC3 与平衡站 MMC4 之间的功率传输反转；负极四端环网依然维持正常运行。换流器故障后各线路和换流站的功率分布如图 4(b)所示。

4.2 直流双极短路故障

从故障影响范围上讲，当直流线路发生单极接地故障时，故障极线路电压跌落，非故障极依然能

够传输功率，而双极短路故障时正负极传输功率均受到影响，因此本文取情况较为严重的双极短路故障进行分析。

如图 5 所示，若仅有 MMC2 与 MMC3 之间发生双极短路故障，送、受端传输通道并未完全阻塞，只需直流断路器将故障线路开断，系统依然可以维持开环稳态运行。然而在送、受端换流站完全分离的特殊工况下，其故障穿越控制及能量耗散需要进一步分析。

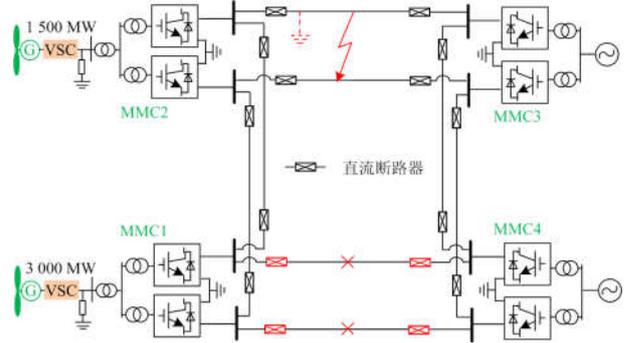


图 5 开环运行时直流双极短路故障

Fig. 5 DC bipolar short circuit fault during open-loop operation

当 MMC1 与 MMC4 之间的直流线路处于检修状态时，四端直流电网开环运行，此时 MMC2 与 MMC3 之间发生双极短路故障将导致 WFMMC 与 GSMC 功率传输完全隔断，风电场在故障后几毫秒内来不及做出反应，其发出的 4 500 MW 功率一旦灌注到 WFMMC 中，将造成 MMC1 与 MMC2 换流站崩溃，此时需依靠耗散电阻吸收故障期间的过剩功率。

MMC 各换流站检测到直流电压跌落时，直流控制环切换为零直流电流控制，如图 2 直流控制环状态 III 所示。通过降低直流调制比 M_{dc} 控制全桥子模块负投入，从而使直流电网运行在 0 直流电压附近。耗散电阻检测到直流电压低于 0.9 p.u.时投入，根据分级控制策略确定投入大小，保护 MMC 子模块和系统的安全。

直流故障清除后，GSMC 恢复为定直流电压控制，直流电压跟随斜升函数上升；当 $U_{dcpu} > 0.9$ 时，耗散电阻不再投入，WFMMC 直流控制环恢复为子模块平均电压控制，风电功率重新进行输送。斩波电阻限制 FPC 直流电压不超过 1.1 p.u.，避免风电出口电压过高造成危害。

5 仿真实验

5.1 仿真系统参数

为验证本文所提出的理论分析和控制策略，在

PSCAD/EMTDC 仿真平台下搭建了图 1 所示系统。3 个风电场额定容量均为 1 500 MVA, 出口电压为 138 kV, 经过升压变压器连接至风场侧 MMC。耗散电阻 R_1 由 4 个 140 Ω 可通断的电阻并联组成; 斩波电阻根据系统容量和电压等级选取为 5 Ω 。系统各换流站的单极换流器参数如表 2 所示。

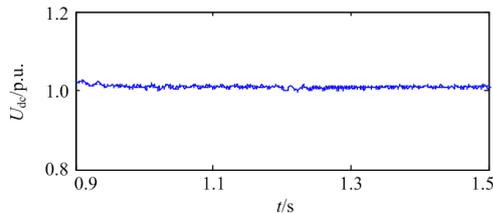
表 2 混合型 MMC-MTDC 参数

Table 2 Parameters of hybrid MMC-MTDC

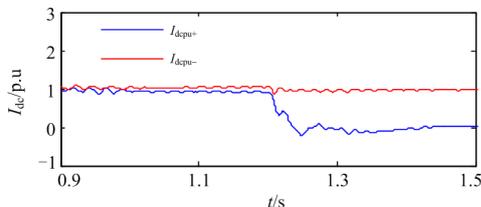
换流站		MMC1	MMC2	MMC3	MMC4
参数					
换流器额定容量/MVA		1 500	750	750	1 500
网侧交流母线电压/kV		230	230	525	525
直流电压/kV		500	500	500	500
联接 变压器	额定容量/MVA	1 800	900	900	1 800
	电压比	230/260	230/260	525/260	525/260
	短路阻抗 uk/%	15	15	15	15
子模块额定电压/kV		2.05	2.05	2.05	2.05
单桥臂 子模块 个数	半桥 子模块	122	122	122	122
	全桥 子模块	122	122	122	122
子模块电容值/mF		15	8	8	15
桥臂电抗/mH		50	50	50	50
平波电抗器/mH		150	150	150	150

5.2 风功率额定换流器退出运行仿真

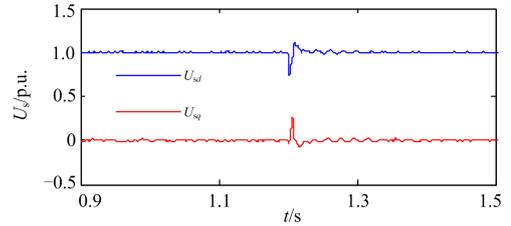
为验证耗散电阻在换流器退出运行后的吸收效果, 风电场设置额定出力 1 500 MW, 系统 1.1 s 之前进入稳定运行。MMC2 正极换流器在 1.2 s 因故障退出运行, 耗散电阻根据分级投入策略确定投入 70 Ω (2 组)进行功率吸收, 使 MMC2 负极换流器维持正常运行, 其仿真结果如图 6 所示。



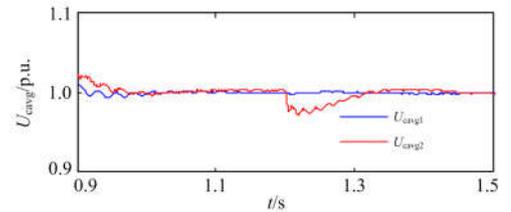
(a) 直流线路电压



(b) 故障极与非故障极直流线路电流



(c) 并网交流电压



(d) 风场侧换流站子模块平均电容电压

图 6 MMC2 正极换流器退出运行仿真波形

Fig. 6 Waveforms of MMC2 positive converter out of operation

图 6(a)为直流电网的直流电压, 可以看出换流器退出运行前后直流电压维持稳定。图 6(b)为 MMC2 正负极的直流电流, 1.2 s 后系统检测到正极换流器故障退出运行, 流过正极换流器的直流电流迅速减小为 0, 负极电流维持正常运行。风电场侧混合型 MMC 无闭锁运行, 使并网交流电压持续受控稳定, 如图 6(c)所示。MMC2 正极换流器退出运行后, 耗散电阻投入吸收原先正极换流器接收的功率, 在投入瞬间 MMC2 子模块放电使平均电容电压有所跌落, MMC1 不受影响, 如图 6(d)所示。在耗散电阻导通期间, 流过耗散支路的三相浪涌电流为 1.90 kA, 晶闸管阀组应具备此电流下长时间运行能力。为保证耗散效果, 耗散装置应采用干式、户外安装, 并配备相应的冷却系统。

5.3 风功率额定直流短路故障穿越仿真

为验证耗散电阻在直流短路故障期间的吸收效果, 考虑最严重工况, 风电场设置额定出力 1 500 MW, 系统 1.1 s 之前进入稳定运行。MMC1 与 MMC4 之间的直流线路在 1.3 s 后进行检修, 此时 MMC2 与 MMC3 之间发生直流双极短路故障, 故障持续 0.1 s, 耗散电阻通过分级投入控制策略确定每相投入电阻 35 Ω (4 组)。直流检修线路至 1.8 s 恢复运行。仿真结果如图 7。

在图 7(a)中, 直流电压因故障迅速下降到零, 换流站检测到直流电压落后后切换到零直流电流控制。由于混合型 MMC 在故障期间无闭锁运行, 风场侧换流器中子模块瞬时放电及时得到补充, 换流站仍可以控制交流电压稳定, 如图 7(b)所示。图 7(c)和图 7(d)分别为故障前后单极线路和换流站的功率分布情况, 可以看到系统在 1.3 s 因故障功率跌落,

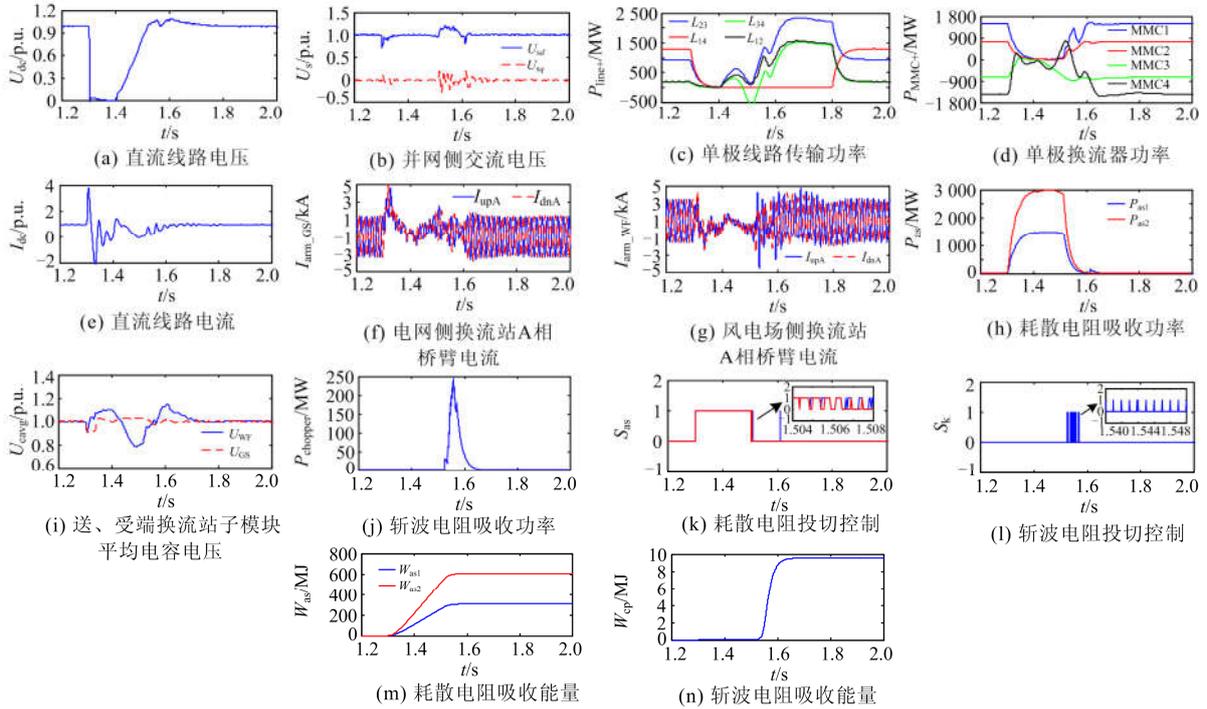


图7 线路检修期间直流故障穿越仿真波形

Fig. 7 Waveforms of DC fault ride-through during line maintenance

至 1.5 s 功率恢复输送, 1.65 s 后四端风电柔直电网进入开环稳态运行, 1.8 s 后检修线路恢复传输, 经过 0.05 s 系统进入闭环稳态运行, 与线路检修前正常运行状态一致。从图 7(e)~图 7(g)可以看出, 虽然故障瞬时直流电流上升到额定值的两倍以上, 但混合型 MMC 的桥臂电流仍然在安全范围内。图 7(h)中, 当直流电压下降到 0.9 p.u. 以下时, MMC1 和 MMC2 交流侧耗散电阻吸收故障期间风电场发出的功率, 保证换流站中能量均衡。因此, GSMMC 和 WFMMC 的子模块电容不会发生过电压和过电流现象, 如图 7(i)所示。1.4 s 故障清除后, GSMMC4 恢复定直流电压控制, WFMMC 和 GSMMC 之间的功率恢复输送。斩波电阻检测 FPC 的直流电压, 防止因风电瞬时功率过高给换流站带来危害, 其吸收的功率如图 7(j)所示。图 7(k)和图 7(l)分别为耗散电阻和斩波电阻的投切控制信号, 采用晶闸管控制的耗散电阻需满足 0.5 ms 内导通, 采用 IGBT 控制的斩波电阻需满足 0.02 ms 内导通。由图 7(m)可以看出, 耗散电阻在 3 000 MW 换流站交流侧吸收 600 MJ, 1 500 MW 换流站交流侧吸收 300 MJ, 平均每组耗散电阻吸收能量 75 MJ。耗散电阻能量吸收过程约 250 ms, 因此其控制导通的晶闸管阀组能在三相浪涌电流 3.79 kA 下运行不少于 250 ms。图 7(n)为直流电压恢复期间每个风电场内 5 Ω 斩波电阻在 150 ms 内吸收能量 9.5 MJ。1.85 s 后整个系

统恢复闭环正常稳定运行, 输送额定功率。

以上分析验证了风电四端柔直电网具有直流故障穿越及快速恢复能力, 故障期间能量耗散装置能够有效吸收风电功率。

6 结论

针对多端风电柔直并网系统的换流器和线路故障问题, 本文提出了无闭锁故障穿越及能量耗散方案, 并根据所需耗散功率设计了耗散电阻分级投入策略, 依靠耗散电阻与斩波电阻的配合吸收故障期间的风电功率。通过仿真验证得到以下结论。

1) 基于混合型 MTDC 的风电并网系统可以无闭锁穿越直流故障; 提出耗散电阻与斩波电阻配合吸收故障风电能量的策略, 耗散电阻和斩波电阻的投切判据均检测本地信号量, 无需依赖于远距离站间通信。

2) 依靠耗散电阻分级投入, 在系统送端单极换流器因故障退出运行时, 吸收过剩能量, 使风机能够维持正常运行, 系统运行平稳过渡, 功率持续传输。

3) 子模块采用平均电容电压控制, 使 MMC 子模块电容器在换流器和线路故障过程中始终运行在 0.8~1.2 p.u. 范围内, 维持 MMC 内部能量均衡, 保护了系统的安全运行。

本文目前仅研究了 MMC-MTDC 风电并网系统中两种严重故障的运行控制及能量耗散方法, 对于

柔性直流电网中不同位置不同类型的故障处理有待进一步研究。

参考文献

- [1] 李道洋, 姚为正, 吴金龙, 等. 应用于海上风电场柔性直流接入系统的直流故障穿越协同控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 47-54.
LI Daoyang, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Coordinated DC fault ride-through control strategy for offshore wind farm interconnection with flexible HVDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 47-54.
- [2] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风电场并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.
WEN Jinyu, CHEN Xia, YAO Meiqi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-61.
- [3] 洪莎莎, 武迪, 吕宏水, 等. 基于高阶系统模型的 VSC-MTDC 下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 125-131.
HONG Shasha, WU Di, LÜ Hongshui, et al. Droop control strategy research of VSC-MTDC based on high-order system model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 125-131.
- [4] 陈燕红, 李世军, 李延平, 等. 基于内模控制的 MMC-HVDC 海上风电场不对称电网下的保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 95-103.
CHEN Yanhong, LI Shijun, LI Yanping, et al. Internal model control based protection strategy for MMC-HVDC offshore wind farm under unbalanced grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 95-103.
- [5] GOMIS-BELLMUNT O, EGEA-ALVAREZ A, JUNYENT-FERRE A, et al. Multiterminal HVDC-VSC for offshore wind power integration[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, Detroit, MI, USA: 1-6.
- [6] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [7] 李英彪, 卜广全, 王姗姗, 等. 张北柔直电网工程直流线路短路过程中直流过电压分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3391-3399, 3666.
LI Yingbiao, BU Guangquan, WANG Shanshan, et al. Analysis of DC overvoltage caused by DC short-circuit fault in Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3391-3399, 3666.
- [8] 许义佳, 罗映红, 史彤彤, 等. 具有直流故障自清除能力的新型 MMC 子模块及其混合拓扑[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 129-137.
XU Yijia, LUO Yinghong, SHI Tongtong, et al. A new MMC sub-module with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 129-137.
- [9] ZENG R, XU L, YAO L Z, et al. Hybrid HVDC for integrating wind farms with special consideration on commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 789-796.
- [10] 曹帅, 向往, 姚良忠, 等. 风电经混合型 MMC-HVDC 并网系统的交直流故障穿越分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 37-43.
CAO Shuai, XIANG Wang, YAO Liangzhong, et al. AC and DC fault ride-through analysis of hybrid MMC-HVDC integrating wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 37-43.
- [11] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.
- [12] 郭晓茜, 崔翔, 齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2177-2185.
GUO Xiaoqian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2177-2185.
- [13] XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. Four-channel control of hybrid MMC with pole-to-ground DC fault ride through capability[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA: 1-5.
- [14] 阳岳希, 贺之渊, 周杨, 等. 厦门±320 kV 柔性直流输电工程的控制方式和运行性能[J]. 智能电网, 2016, 4(3): 229-234.
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, ZHOU Yang, et al. Control mode and operating performance of Xiamen ±320 kV VSC-HVDC project[J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 229-234.

- [15] 何炎, 李周, 李亚州, 等. 基于真双极接线的 VSC-MTDC 系统功率转代策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 95-101.
HE Yan, LI Zhou, LI Yazhou, et al. Power conversion strategy of VSC-MTDC system based on real bipolar wiring mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 95-101.
- [16] 鲁晓军, 林卫星, 姚良忠, 等. 辅助经 VSC-HVDC 并网的海上风电场故障穿越的动态制动电阻参数设计与控制策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 19-26.
LU Xiaojun, LIN Weixing, YAO Liangzhong, et al. Parameter design and control strategy of dynamic braking resistor for aiding fault ride-through of offshore wind farms connected through VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 19-26.
- [17] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [18] 董旭, 张峻樾, 王枫, 等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 48-55.
DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVDC overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48-55.
- [19] XIANG Wang, LIN Weixing, XU Lie, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [20] 樊壮, 陈卫, 钟柯, 等. 基于直驱风机风电场的无功综合调配策略研究[J]. 电气技术, 2017(4): 22-26, 43.
FAN Zhuang, CHEN Wei, ZHONG Ke, et al. Research of reactive power allocation strategy based on PMSG wind farm[J]. Electrical Engineering, 2017(4): 22-26, 43.
- [21] 王晨, 庄劲武, 张超, 等. 串联晶闸管在大脉冲电流下的开通过程研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(3): 14-19.
WANG Chen, ZHUANG Jinwu, ZHANG Chao, et al. Research of series thyristor turn-on process with high pulse current[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(3): 14-19.
- [22] 刘宾礼, 刘德志, 罗毅飞, 等. 基于电压电流的 IGBT 关断机理与关断时间研究[J]. 物理学报, 2013, 62(5): 392-400.
LIU Binli, LIU Dezhi, LUO Yifei, et al. Investigation into the turn-off mechanism and time of IGBT based on voltage and current[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(5): 392-400.
- [23] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis on the low voltage ride through capability of direct drive permanent magnetic generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 73-77.

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2018-07-01

作者简介:

曹 帅(1995—), 男, 博士研究生, 从事新能源并网、柔性直流输电及直流电网的运行控制分析;
E-mail: caoshuaisgo@foxmail.com

向 往(1990—), 男, 博士, 通信作者, 主要从事柔性直流输电技术、直流电网、交直流电网运行与控制等方面的研究。E-mail: xiangwang1003@foxmail.com

(编辑 周金梅)