

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200880

# 风电经双极混合型 MMC-HVDC 并网的直流故障 穿越协调控制策略

李国庆, 张林, 江守其, 辛业春

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 架空线 MMC-HVDC 是大规模风电友好型并网和可靠送出的有效手段。针对架空线故障率高的问题, 采用对称双极接线方式和具备故障阻断能力的混合型 MMC 是其主要解决方案之一。基于此方案提出了风电经双极混合型 MMC-HVDC 并网的直流故障穿越协调控制策略。通过混合型 MMC 零直流电压控制实现了故障电流的有效阻断, 并维持了故障极 MMC 对交流电压的支撑能力。基于对称双极接线方案运行方式灵活的特点, 根据故障极功率能否被非故障极完全吸收, 分别提出了自吸收和非自吸收工况下非故障极 MMC 的控制策略及其参数调整原则。并基于风电场频率响应能力设计了无需通信的精确减载控制策略, 以实现非故障极 MMC 满载运行, 在维持系统安全稳定运行的同时降低对受端交流系统的影响。最后, 基于 Matlab/Simulink 搭建并网系统模型, 验证了所提直流故障穿越协调控制策略的有效性。

**关键词:** 风电并网; 对称双极柔性直流系统; 零直流电压; 直流故障穿越; 协调控制策略

## Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar hybrid MMC-HVDC overhead lines

LI Guoqing, ZHANG Lin, JIANG Shouqi, XIN Yechun

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract:** The overhead line MMC-HVDC is an effective method for large-scale wind-power-friendly grid connection and reliable delivery. Faced with the high failure rate of overhead lines, a scheme of adopting symmetrical bipolar wiring and hybrid MMC with fault blocking capability is one of the main methods of tackling this. Based on this scheme, this paper proposes a DC fault ride-through coordinated control strategy for grid-connected wind power via a bipolar hybrid MMC-HVDC. Through hybrid MMC zero DC voltage control, the fault current is effectively blocked and the support ability of the fault pole MMC to the AC voltage is maintained. Based on the flexible operation mode of the symmetrical bipolar wiring scheme, and according to whether the fault pole power can be completely absorbed by non-fault poles, the control strategies of non-fault pole under self-absorption and non-self-absorption conditions and parameter adjustment principles are designed. Based on the frequency response capability of the wind farm, a control strategy without communication is designed to achieve accurate load reduction of wind power, and then achieve full load operation of a non-faulty MMC. This scheme could reduce the impact on the receiving AC system while maintaining the safe and stable operation of the system. Finally, a grid-connected system model is built on Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed DC fault ride-through coordinated control strategy.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5102-20199343A-0-0-00).

**Key words:** wind power integration; bipolar MMC-HVDC; zero DC voltage control; DC fault ride-through; coordinated control strategy

## 0 引言

我国风能资源丰富, 目前风电累计并网装机容量

量已达 2.13 亿 kW<sup>[1]</sup>, 但电网建设和快速发展的新能源不同步导致弃风现象严重, 限制了风电利用率的提升<sup>[2-4]</sup>。基于模块化多电平换流器的柔性直流输电(Modular Multilevel Converter based High Voltage direct current, MMC-HVDC)技术具备有功无功独立控制、可连接异步电网的优势, 采用架空线 MMC-

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5102-20199343A-0-0-00)

HVDC 进行大容量、远距离输电是大规模风电友好型并网、减少弃风现象的主要解决方案<sup>[5-7]</sup>。

由于架空线路相对于电缆线路故障率较高<sup>[8]</sup>，因此，风电直流联网系统必须具备一定的直流故障处理能力。目前，针对架空线 MMC-HVDC 直流故障主要有两种解决方案：(1) 采用直流断路器(Direct Circuit Current Breaker, DCCB)；(2) 改进换流器拓扑结构，使其具有故障阻断能力<sup>[9-10]</sup>。其中，方案(1)需要利用 DCCB 在几 ms 内切断数倍于线路额定电流的故障电流，才能避免换流器闭锁<sup>[11]</sup>，但由于高压大容量直流断路器开断成本及其技术难度较高，可靠性有待进一步验证。针对换流器拓扑结构进行的改进方案主要有全桥子模块 (Full-Bridge Sub-Module, FBSM)、双箝位子模块和由 FBSM 与半桥子模块(Half-Bridge Sub-Module, HBSM)级联而成的混合型 MMC(Hybrid Modular Multilevel Converter, HMMC)<sup>[12-14]</sup>。其中 FBSM 和双箝位子模块由于使用的电力电子器件数量增多，导致成本过高，在工程上的应用受到一定限制<sup>[15]</sup>。而混合型 MMC 不仅具备无闭锁故障穿越能力，同时兼顾了 HBSM 的经济性，有效降低了工程成本，并且全桥半桥子模块等比例配置的技术方案已经在乌东德±800 kV 直流输电工程受端换流站中应用<sup>[16-17]</sup>。由此可见，依托于混合型 MMC-HVDC 的风电并网系统具有较好的工程应用前景。

另一方面，由于风电场在直流故障期间功率仍持续注入，将导致换流站子模块电容过电压，损坏电力电子器件。为克服不平衡功率对系统的影响，学者已经从子模块拓扑、系统接线结构、加装耗散电阻等方面进行了相关研究。文献[18]提出一种新型模块化卸荷电路拓扑实现风电场过剩功率的吸收，但其增加了子模块的设计复杂度和控制难度。文献[19]基于真双极系统接线结构运行方式灵活的特点，提出了一种功率转带控制策略，能够在一定程度上平衡故障后的盈余功率，但面对极端情况仍需要切机切负荷配合。文献[20]为实现风电场精确减载，利用风电场与换流站间的协同控制，根据换流站直流侧电压前馈信号，通过斜率控制实现风电

场减载，但该方法无法克服通信延时的问题，影响系统的控制响应速度。文献[21]提出在直流侧加装耗散电阻吸收过剩功率，但电阻阻值过大，导致成本高，占用空间大。文献[22]和文献[23]分别针对双端伪双极、多端真双极系统，设计了风电场过剩功率耗散策略，即采用交流侧耗散电阻吸收盈余功率，维持故障后风电并网系统功率平衡，由于该方案要求在短时间内清除故障，同时切除耗散电阻，恢复功率传输，但在面对永久性故障时，必须配合风电机组的切除，影响系统的恢复速度。

为克服以上不足，本文针对大规模双馈异步发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)风电场经架空线双极混合型 MMC-HVDC 并网系统，充分利用风电场和换流站的调控能力，设计了直流侧无闭锁故障穿越协调控制策略。该策略基于混合型 MMC 零直流电压控制和子模块平均电容电压控制，实现故障电流的有效阻断，同时可保证故障极交流出口电压稳定，为风电场提供电压支撑。故障阻断后，针对自吸收和非自吸收两种工况，分别设计了非故障极 MMC 的控制策略，并基于 MMC 定频率控制与风电场频率响应能力设计了无需通信的风电场精确减载控制策略，从而在实现故障穿越的同时尽可能地送出风电场功率，有效降低风电机组的切机概率。最后，通过 Matlab/Simulink 仿真，验证了两种工况下所提直流故障穿越协调控制策略的有效性。

### 1 风电场经双极混合型 MMC-HVDC 并网系统结构及控制策略

DFIG 风电场经对称双极混合型 MMC-HVDC 并网的系统结构如图 1 所示。系统由风电场、混合型 MMC、直流架空输电线路和交流电网构成。采用对称双极带金属回线接线方案，运行方式灵活，可靠性高，除单站作为 STATCOM 运行外，典型的运行方式还有双极带金属回线单端接地运行方式、双极不带金属回线双端接地运行方式和单极带金属回线单端接地运行方式，运行方式切换依靠中性母线开关(Neutral Bus Switch, NBS)实现。

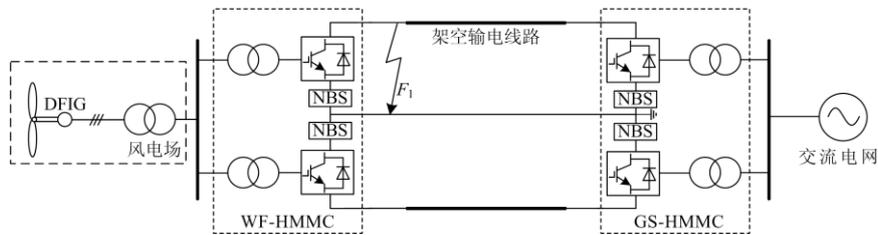


图 1 风电场经混合型 MMC-HVDC 并网拓扑

Fig. 1 Topology of wind power integration via hybrid MMC-HVDC

送端换流站(Wind Farm-Hybrid MMC, WF-HMMC)和受端换流站(Grid Side-Hybrid MMC, GS-HMMC)上、下极均采用混合型 MMC 拓扑结构,如图 2 所示,各相桥臂均由占比为 50%的 FBSM 和 HBSM 与桥臂电抗器(L)串联组成。在风电经混合型 MMC-HVDC 并网系统中,WF-HMMC 通常采用定频率/交流电压控制,为风电场提供恒定频率的交流电压支撑,以维持风电场的安全稳定运行<sup>[24]</sup>。GS-HMMC 则采用定直流电压/无功功率控制,以维持柔性直流输电线路直流电压稳定,同时可以为受端交流电网提供必要的无功支撑。

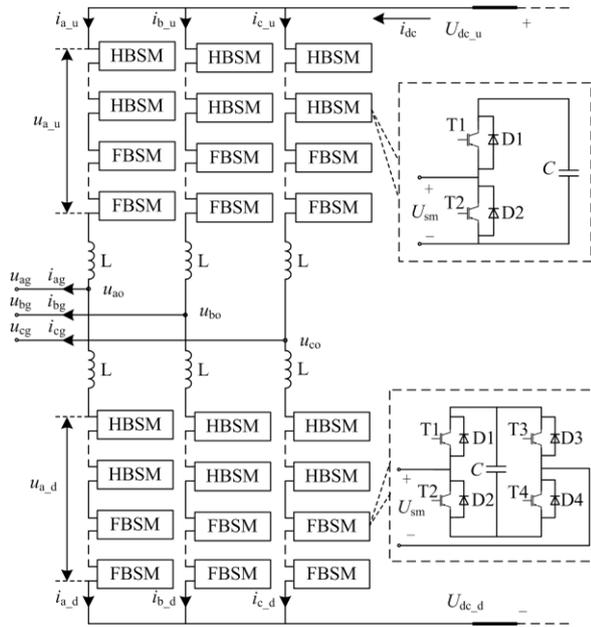


图 2 混合型 MMC 拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of hybrid MMC

## 2 直流故障穿越协调控制策略

当图 1 所示系统直流侧架空线路发生单极接地短路故障时,故障极 MMC 中的子模块电容迅速向故障点放电,产生的过电流可能导致 MMC 闭锁,进而导致其交流出口电压和频率失控,严重威胁风电场的运行安全。因此,快速阻断故障电流,防止故障极 MMC 闭锁是实现系统故障穿越的重要前提;在故障电流阻断后,故障极 MMC 无法继续传输有功功率,此时可利用非故障极 MMC 的功率转带能力吸收部分或全部的故障极功率,以减小不平衡功率对风电场及受端交流系统的影响,进而提高风电直流并网系统的直流故障穿越能力。基于以上分析及控制需求,本文分别对混合型 MMC 故障电流阻断控制策略及不平衡功率协调控制策略进行了研究,以提高风电直流并网系统的故障穿越能力。

### 2.1 故障电流阻断控制策略

由于 FBSM 具备输出负电平的能力,混合型 MMC 的直流电压运行范围相比于传统半桥型 MMC 较广,通过其直流侧输出电压即可实现直流故障电流的有效阻断。混合型 MMC 正常运行时上、下桥臂输出电压  $u_{x,u}$  和  $u_{x,d}$  ( $x=a,b,c$ ) 及其运行范围如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} u_{x,u} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{xo} = M_{dc} \frac{U_{dc}}{2} - M \frac{U_{dc}}{2} \cos(\omega t + \varphi) \\ u_{x,d} = \frac{U_{dc}}{2} + u_{xo} = M_{dc} \frac{U_{dc}}{2} + M \frac{U_{dc}}{2} \cos(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{U_{dc}}{2} (M_{dc} - M) \leq \{u_{x,u}, u_{x,d}\} \leq \frac{U_{dc}}{2} (M_{dc} + M) \quad (2)$$

式中:  $U_{dc}$  表示 FBSM 正常投入时直流侧电压;  $\varphi$  表示交流出口电压相位;  $M_{dc}$  表示混合型 MMC 直流调制比,且满足约束条件  $0 \leq M_{dc} \leq 1$ ;  $M$  表示混合型 MMC 交流调制比。

通过分析可知,调整  $M_{dc}$  取值可使混合型 MMC 运行于正常电压工作模式或降直流电压工作模式,当直流侧发生短路接地故障时,其故障点电压将瞬间跌落至 0,此时需保证故障极混合型 MMC 运行于零直流电压工作模式,即令  $M_{dc} = 0$ ,上、下桥臂输出电压反相,如图 3 所示,其中,  $u_{x,um}$  和  $u_{x,dm}$  分别表示上、下桥臂电压最大可运行区间(考虑 10% 子模块数量配置裕度),其值略高于实际桥臂电压运行峰值。从而使其直流出口电压为 0,阻止子模块电容向故障点放电,最终实现故障电流的迅速阻断。

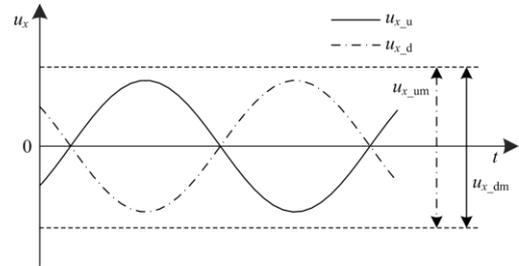


图 3 零直流电压控制原理图

Fig. 3 Schematic of zero DC voltage control

在利用零直流电压控制阻断故障电流期间,为防止风电场输出功率持续注入故障极 MMC,造成子模块电容过电压,本文采用文献[25]所提出的子模块平均电容电压控制策略,以维持各桥臂子模块电容电压的稳定,同时保证故障清除后混合型 MMC 能够快速恢复至稳定运行状态,缩短系统恢复时间。此外,混合型 MMC 采用零直流电压控制后,其交流侧输出电压可维持不变,即具备交流电压支撑能力,可保证风电场的安全稳定运行。

基于以上分析可知，基于零直流电压控制的混合型 MMC 可在阻断故障电流的同时维持交流电压稳定，即运行于 STATCOM 模式，不再传输有功功率，由此产生的不平衡功率会对风电并网系统安全运行造成影响，下面将详细介绍不平衡功率的协调控制策略。

### 2.2 不平衡功率协调控制策略

在故障极 MMC 阻断故障电流后，风电场输出功率将完全由非故障极 MMC 吸收，当其超出额定传输容量时，将导致非故障极 MMC 过载，严重影响其安全稳定运行。因此，需要根据故障期间非故障极 MMC 的功率转带能力设计不同的不平衡功率协调控制策略，以在提高系统故障穿越能力的同时减小故障影响范围。

根据以上分析可知，当非故障极 MMC 故障前传输功率与故障极 MMC 需转移的功率  $\Delta P$  满足式 (3) 的约束条件时，其可完全吸收系统不平衡功率，即自吸收工况，此时风电场不参与功率调节，维持正常运行；否则，非故障极 MMC 难以完全消纳系统不平衡功率，即非自吸收工况，此时需要降低风电场输出功率，共同参与不平衡功率调节，以在维持送端系统功率平衡的同时尽可能多地向受端电网传输功率，实现直流故障穿越。

$$\begin{cases} P_{\text{down}} = \sqrt{S_N^2 - Q_{\text{down}}^2} \\ \Delta P + P_{\text{down,com}} \leq P_{\text{down}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S_N$  为非故障极 MMC 额定容量； $P_{\text{down}}$  为非故障极 MMC 最大可传输有功功率； $Q_{\text{down}}$  为非故障极 MMC 输出的无功功率； $P_{\text{down,com}}$  为非故障极 MMC 故障前传输功率。

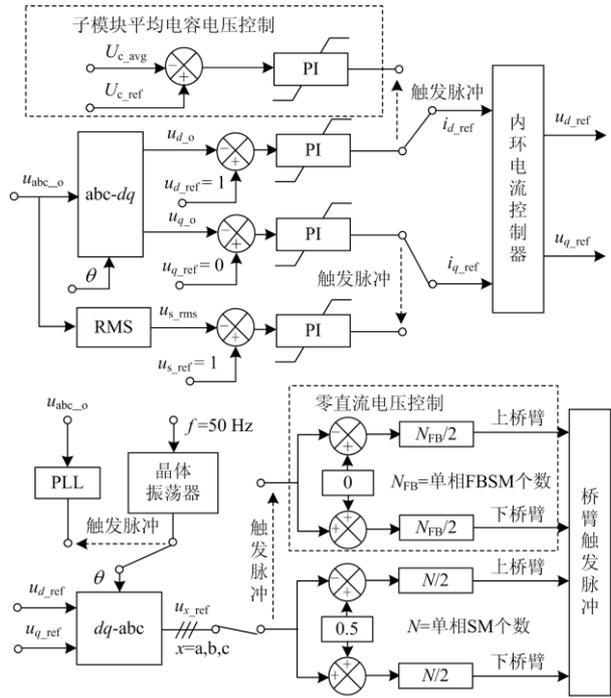
#### 2.2.1 自吸收工况下故障穿越协调控制

针对自吸收工况，为了提升非故障极 MMC 有功功率的传输能力，在故障穿越期间  $P_{\text{down}}$  应尽可能大，即令  $Q_{\text{down}}=0$ 。如图 4 所示，此时直流故障穿越协调控制策略主要包括以下两个方面。

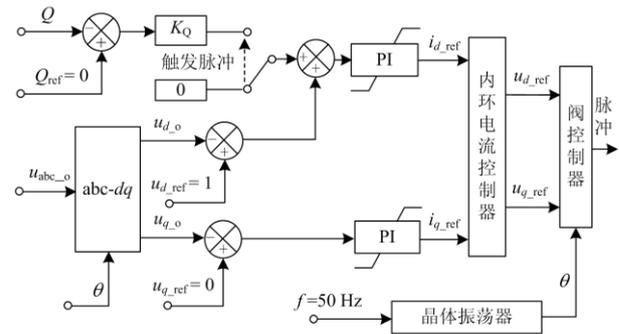
1) 故障极 MMC 控制策略：故障极 MMC 由定频率/交流电压控制切换至定电容电压/交流电压控制，同时采用零直流电压控制，实现故障电流的有效阻断，保护故障极 MMC 安全，此时故障极 MMC 按照 STATCOM 模式运行，保证其交流出口电压质量，同时能够为风电场提供无功支撑，控制框图如图 4(a) 所示。

2) 非故障极 MMC 控制策略：为提升非故障极 MMC 的功率转带能力，其外环无功类控制切换至无功功率-电压下垂控制，同时将无功参考值设为零。有功类控制仍采用定频率控制，以维持风电场

侧系统频率的稳定，并实现故障极 MMC 需转带功率的自主吸收，具体控制原理如图 4(b) 所示。



(a) 故障极混合型 MMC 控制框图



(b) 非故障极混合型 MMC 控制框图

图 4 自吸收工况下故障穿越控制策略

Fig. 4 Control strategy of fault ride-through under self-absorption condition

根据以上分析可知，在自吸收工况下，基于零直流电压控制和换流站内部功率自吸收能力，可在无需风电场参与功率调节的情况下，使系统稳定到新的运行状态，有效减少了故障影响范围，实现直流故障穿越。

#### 2.2.2 非自吸收工况下故障穿越协调控制

非自吸收工况下的功率转带控制策略和自吸收工况一致，但通过零直流电压控制阻断故障电流后，单纯利用非故障极 MMC 功率自主吸收能力已无法实现故障极功率的全部转带，因此，需要在非故障极

满功率运行的情况下, 配合风电场功率减载共同完成不平衡功率调节, 以在保证系统安全稳定运行的同时降低受端交流系统负荷的风险。此时, 风电场的减载功率 $\Delta P_{WF}$ 应该满足如式(4)所示约束条件。

$$\Delta P_{WF} = \Delta P + P_{down,com} - P_{down} \quad (4)$$

已有相关文献介绍了风电场减载的控制方法, 其中: 快速通信法需要通过风电场与换流站间的通信实现减载功率的传输, 由于存在通信延时, 导致风电场响应速度较慢; 降压法需要主动降低风电场侧交流电压实现风电场减载, 但其会影响非故障极 MMC 的运行状态及功率传输能力, 因此难以适用于对称双极系统; 而风电场具备频率响应能力是实现其友好型并网的有效手段, 具有较好的应用前景。通过以上分析, 本文基于频率控制思想设计了换流站与风电场间的协调控制策略, 即在故障穿越期间利用非故障极 MMC 的频率控制能力精确提升风电场侧频率, 并结合风电机组的频率响应能力实现风电场的精确减载。该方法无需依靠风电场与换流站间通信, 极大地提升了风电场功率减载的响应速度。

根据同步发电机的一次调频原理, 定义双馈风电场的等值调差系数  $K$  为

$$K = \frac{\Delta f}{\Delta P_{WF}} \quad (5)$$

式中,  $\Delta f$  为送端系统频率变化量。

设稳态时风电场最大运行功率  $P_1$  及机组转子转速达上限值时的输出功率  $P_{min}$  表达式如式(6)<sup>[26]</sup>。

$$\begin{cases} P_1 = k_{mppt} \omega_1^3 \\ P_{min} = k_{min} \omega_2^3 = k_{min} (1.2\omega_N)^3 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k_{mppt}$ 、 $k_{min}$  为对应功率曲线跟踪系数;  $\omega_1$  为当前转子转速,  $\omega_2$  为转子转速上限值,  $\omega_N$  为转子额定转速, 通常取  $\omega_2 = 1.2\omega_N$ 。

DFIG 机组稳态时运行于最大功率点, 当系统频率波动后, 风电机组输出功率满足如下关系:

$$P_1' = P_1 - \Delta P_e = k_{mppt} (\omega_1 - \Delta\omega)^3 = k_{mppt} (\omega_1^3 - 3\omega_1^2\Delta\omega + 3\omega_1\Delta\omega^2 - \Delta\omega^3) \quad (7)$$

在转速调节范围不大时, 可认为  $\omega_1 \gg \Delta\omega$ , 式(7)化简整理后可得

$$\Delta P_e \approx k_{mppt} 3\omega_1^2 \Delta\omega = \frac{\Delta P_{max}}{f_{max} - f_N} \Delta f \quad (8)$$

式中:  $f_{max}$  为系统允许运行频率峰值, 一般偏差不大于 0.5 Hz;  $\Delta P_{max}$  为当前风速下极限调频功率, 可表示为该风速下  $P_1$  与  $P_{min}$  之差, 如式(9)所示。

$$\Delta P_{max} = P_1 - P_{min} = k_{mppt} \omega_1^3 - k_{min} (1.2\omega_N)^3 \quad (9)$$

将  $\Delta P_{max}$  代入式(8)并整理可得

$$\Delta f = K \Delta P_e = K \times k_{mppt} 3\omega_1^2 \Delta\omega \quad (10)$$

$$K = \frac{f_{max} - f_N}{k_{mppt} \omega_1^3 - k_{min} (1.2\omega_N)^3} \quad (11)$$

根据上述分析可知, 当系统最终运行至新的稳态点时,  $\Delta P_e$  即为风电场的减载功率  $\Delta P_{WF}$ , 在频率调整范围内满足  $\Delta\omega \propto \Delta P_{WF} \propto \Delta f$ , 并且利用风电机组当前转速和相关跟踪系数即可确定对应风速下的  $K$  值, 最后结合非故障极 MMC 的频率控制即可实现风电场的精确减载, 具体实施方法如下:

1) 非故障极 MMC 根据风电场的减载功率  $\Delta P_{WF}$  及其等值调差系数  $K$  确定频率变化量  $\Delta f$ , 并将其叠加至非故障极 MMC 的频率参考值  $f_N$ , 从而控制风电场侧的系统频率达到新的稳态值  $f_N + \Delta f$ 。

2) 风电场实时监测系统频率  $f$ 。当  $f > f_N$  时, 立即进入基于频率响应的超速减载控制模式, 即可根据式(5)计算得到风电场调频减载功率  $\Delta P_{WF}$ , 并结合式(8)风电场输出功率与转速之间的函数关系  $F(x)$  得到转速偏差量  $\Delta\omega$ , 将其叠加在最大功率跟踪控制下的转速  $\omega_1$  上得出新的转速控制指令  $\omega_{ref}$ , 进而实现风电场的精确减载控制, 如图 5 所示; 当  $f < f_N$  时,  $\Delta\omega = 0$ , 不参与系统功率调节, 风电场继续工作在最大功率跟踪模式, 以提高风能利用效率。该过程中系统频率  $f$  是由风电场内部监测所得, 消除了风电场与换流站通信的固有延时, 提升了故障后的风电场减载响应速度。

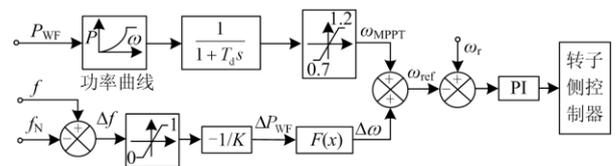


图 5 风电场超速减载控制策略

Fig. 5 Over-speed load reduction control strategy of wind farm

由此可见, 在非自吸收工况下, 利用非故障极 MMC 和风电场的频率控制能力, 即可在无需通信的情况下, 实现风电场的精确减载和非故障极 MMC 的满载运行, 可有效提高系统的直流故障穿越能力。

综合以上分析, 针对自吸收工况和非自吸收工况需采取不同的协调控制策略, 以降低故障影响范围, 提高系统恢复能力。因此, 在实际工程中, 应根据故障隔离后的系统运行状态选取对应的协调控制策略, 以尽可能地保证功率传输, 提升并网系统

安全稳定运行的能力。

### 3 仿真验证

为了验证所提直流故障穿越协调控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 平台搭建如图 1 所示的风电经对称双极混合型 MMC-HVDC 并网的仿真模型,分别对零直流电压控制下的故障电流阻断效果和两种工况下不平衡功率协调控制方法进行仿真验证。系统相关仿真参数如表 1 所示,仿真步长为  $25 \mu\text{s}$ 。

表 1 换流站仿真参数

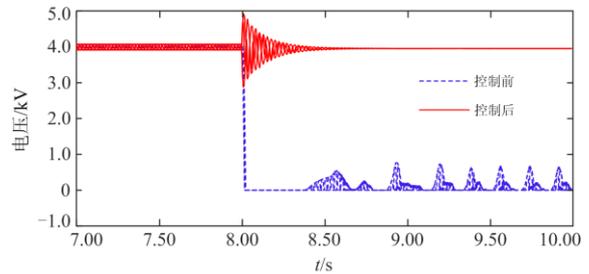
Table 1 Simulation parameters of converters

仿真参数	数值
风电场额定容量/MVA	1 000
风电场出口电压/kV	155
交流系统额定电压/kV	230
单极换流变压器额定容量/MVA	540
单极换流变压器变比/(kV/kV)	230/166
单极额定容量/MVA	500
直流侧额定电压 $U_{dc}$ /kV	320
桥臂子模块个数/个	80
FBSM 占比	50%
子模块电容/mF	3
桥臂电抗器/mH	24
架空线距离/km	50

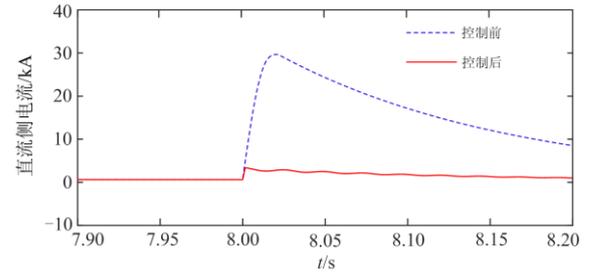
#### 3.1 故障电流阻断控制策略仿真验证

仿真设定风电场输出功率为 400 MW,在 8 s 时,混合型 MMC-HVDC 输电系统直流侧正极发生单极金属接地故障,在 1.5 ms 后故障极切换为零直流电压控制。由于闭锁 HMMC 中全桥子模块也可以阻断故障电流,单纯从故障特性看与本文中的故障阻断控制策略差异不大,因此,控制前仿真除未采用该控制策略外,还取消子模块闭锁阈值限制,进而验证该故障电流阻断控制策略的有效性。

根据图 6(a)、图 6(b)控制前曲线可知,子模块电容迅速放电,导致注入故障点电流迅速上升,故障电流峰值在几 ms 内达到 30 kA,严重危害故障极 MMC 安全。切换到零直流电压控制后,故障电流显著降低,实现故障电流的有效阻断,保证故障极 MMC 的安全运行;同时,在子模块平均电容电压控制作用下,可使故障极 MMC 不再传输有功功率,进而维持电容电压稳定,如图 6(a)、图 6(b)控制后曲线所示,从而验证了所提故障电流阻断控制策略的有效性。



(a) 故障极子模块电容电压波动范围



(b) WF-HMMC 直流侧电流

图 6 故障电流阻断控制下系统暂态特性

Fig. 6 Transient characteristics of system under fault current blocking control

#### 3.2 自吸收工况故障穿越协调控制仿真验证

在 3.1 节参数情况下,验证自吸收工况下系统的暂态响应,图 7 为协调控制前后的仿真对比结果。左侧是采用协调控制前的系统暂态响应仿真结果,由图 7(a)可知,当正极接地故障发生后,若故障极 MMC 不切换控制模式阻断故障电流,故障极 MMC 交流出口电压会大幅跌落,进而严重影响风电场的安全稳定运行,导致系统功率发生振荡,如图 7(b)和图 7(c)所示。

采用本文所提的故障穿越协调控制策略之后,故障电流可以在故障后迅速阻断,同时故障极 MMC 运行于 STATCOM 模式,可为风电场提供无功支撑,维持交流电压稳定,如图 7(b)所示。与此同时,非故障极在定频率控制的作用下可自主吸收系统不平衡功率,维持系统安全稳定运行,如图 7(d)和图 7(f)所示。可以看出,非故障极传输功率由 0.4 p.u. 上升为 0.8 p.u.,风电场发出功率重新稳定到 400 MW,风电场功率完全由非故障极 MMC 自主吸收,实现了直流故障穿越,从而验证了自吸收工况下故障穿越协调控制策略的有效性。

综合以上分析可知,针对自吸收工况,采用所提的直流故障穿越协调控制策略后,并网系统可以较快地稳定到新的运行状态,同时,风电场及受端系统能够维持故障前运行状态,保证了并网系统直流故障穿越能力,提升了系统的安全运行水平。

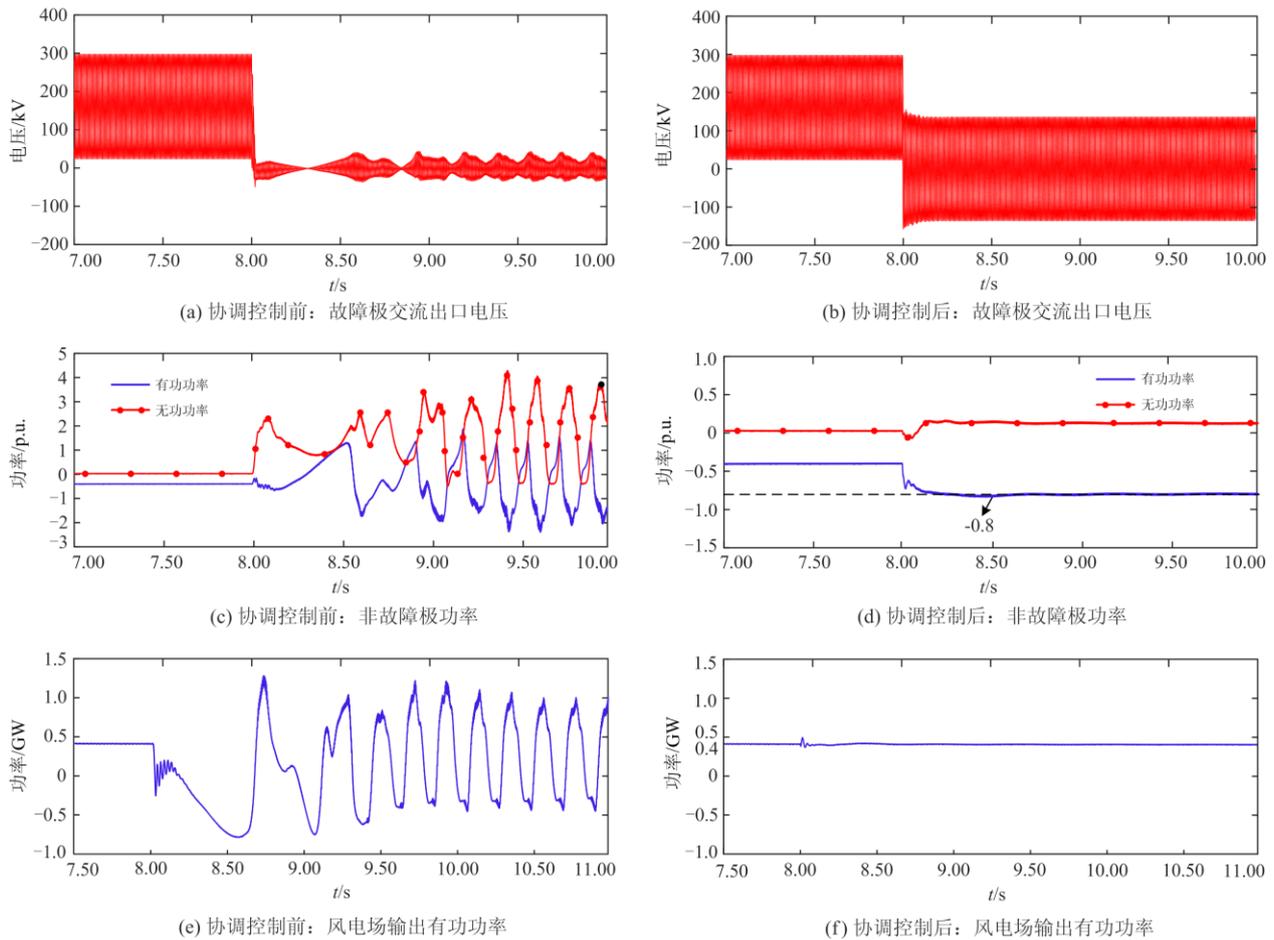


图 7 自吸收工况下风电并网系统暂态特性仿真结果

Fig. 7 Simulation results of transient characteristics of grid-connected wind power system under self-absorption conditions

### 3.3 非自吸收工况故障穿越协调控制仿真验证

通过设定风电机组风速为 11.4 m/s, 使风电场稳态运行时的输出功率为 572 MW, 超过单极输送容量,  $t=8$  s 时在直流侧正极设置永久性短路故障, 1.5 ms 后切换至零直流电压控制阻断故障电流, 同时, 非故障极 MMC 频率参考值采用整定后的数值 50.3 Hz, 风电场在频率响应控制的作用下进入超速减载模式。图 8 为风电场参与协调控制前后系统暂态特性仿真结果。

根据图 8 左侧的仿真结果可以看出, 若不改变非故障极 MMC 的频率参考值, 送端交流系统频率仍将维持在 50 Hz, 如图 8(a)所示, 此时风电场不参与系统不平衡功率调节, 仍保持故障前的输出功率, 如图 8(c)所示。故障极 MMC 采用零直流电压控制后, 有功功率快速下降至 0, 在频率控制作用

下, 风电场输出功率将全部注入非故障极 MMC, 导致其过载运行, 如图 8(e)所示。由于换流站功率器件过载能力较差, 如果长时间处于过载运行状态, 可能导致器件损坏, 危害系统安全运行。采用所提出的协调控制策略后, 在非故障极 MMC 频率控制作用下, 系统频率最终稳定至 50.3 Hz, 如图 8(b)所示。与此同时, 风电场将在频率响应控制作用下实现精确减载, 使其输出功率最终稳定至 500 MW, 如图 8(d)所示, 进而保证非故障极 MMC 的满功率运行, 最大程度保证了并网系统的功率传输能力, 从而降低故障对受端交流系统的影响, 如图 8(f)所示。

综合以上分析可知, 针对非自吸收工况, 利用非故障极 MMC 与风电场的频率控制特性, 即可在实现风电场精确减载的同时保证非故障极 MMC 满载运行, 有效提高了风电直流并网系统的故障穿越能力。

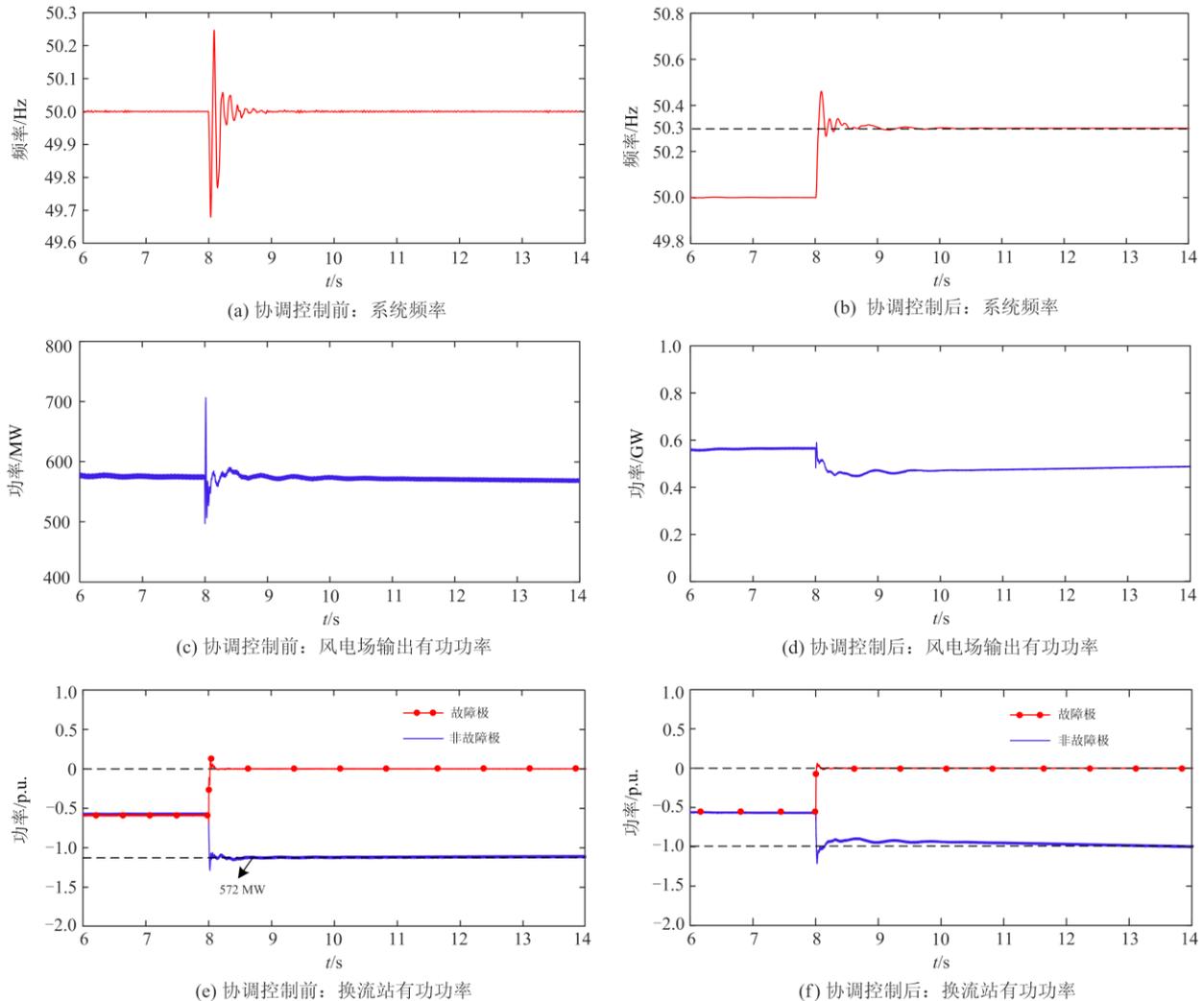


图 8 非自吸收工况下风电并网系统暂态特性仿真结果

Fig. 8 Simulation results of transient characteristics of grid-connected wind power system under non-self-absorption condition

## 4 结论

本文提出了一种适用于风电经双极混合型 MMC-HVDC 并网系统的直流侧无闭锁故障穿越协调控制策略。基于混合型 MMC 的零直流电压控制实现了故障电流的有效阻断,并在此基础上针对自吸收和非自吸收工况,设计了混合型 MMC 和风电场间的协调控制策略及其参数选取原则,其可在无需通信的情况下,实现风电场的精确减载,有效提高了风电并网系统的故障穿越能力。通过仿真分析可以得出如下结论:

1) 自吸收工况下,通过合理切换双极 MMC 的控制策略,即可在不影响风电场及受端系统运行状态的情况下,充分利用非故障极 MMC 功率转带能

力实现不平衡功率的完全吸收,可在保证供电可靠性的同时提高系统的恢复能力。

2) 非自吸收工况下,基于非故障极 MMC 及风电场的频率控制,即可在实现风电场快速精确减载的同时保证非故障极 MMC 满载运行,从而降低故障对受端交流系统的影响,提高系统安全稳定运行能力。

本文提出的直流故障穿越协调控制策略能够有效解决风电经双端直流联网系统架空线故障问题,后续将进一步研究该策略在多端混合型 MMC-HVDC 风电联网系统中的应用。

## 参考文献

[1] 中国国家能源局. 2020 年一季度风电并网运行情况

- [EB/OL]. [2020-05-11]. [http://www.nea.gov.cn/2020-05/11/c\\_139047892.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-05/11/c_139047892.htm).
- [2] 张旭, 查效兵, 岳帅. 基于转子动能控制的 DFIG 调频能力分析 & 调频方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 143-149.  
ZHANG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai. Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly-generator based on the rotor kinetic energy control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 143-149.
- [3] 王一凡, 赵成勇. 混合型风电场经 MMC-HVDC 送出系统的振荡模式分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 18-26.  
WANG Yifan, ZHAO Chengyong. Analysis of oscillation modes of a hybrid-based wind farm transmitted through MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 18-26.
- [4] 周保荣, 李选平, 杨健, 等. 向无源电网供电的 MMC-HVDC 稳态运行区域分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 98-104.  
ZHOU Baorong, LI Xuanping, YANG Jian, et al. Analysis of steady operation region of MMC-HVDC connected to passive network[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 98-104.
- [5] XUE Y, XU Z. On the bipolar MMC-HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission configuration, control, and DC fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2420-2429.
- [6] HU J B, XU K C, LIN L, et al. Analysis and enhanced control of hybrid-MMC-based HVDC systems during asymmetrical DC voltage faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1394-1403.
- [7] 余浩, 肖彭瑶, 林勇, 等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 30-38.  
YU Hao, XIAO Pengyao, LIN Yong, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 30-38.
- [8] YAO Z Q, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [9] LIN W X, JOVICIC D, NGUEFEU S, et al. Full-bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.
- [10] 苏见燊, 郭敬东, 金涛. 柔性直流电网中直流故障特性分析及线路故障重启策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 352-359.  
SU Jianshen, GUO Jingdong, JIN Tao. DC fault characteristics and line fault recovery strategy in flexible DC power network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 352-359.
- [11] 刘波, 贺志佳, 金昊. 风力发电现状与发展趋势[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(2): 7-13.  
LIU Bo, HE Zhijia, JIN Hao. Wind power status and development trends[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2016, 36(2): 7-13.
- [12] 廖敏, 许韦华, 杨杰, 等. 考虑子模块均压约束的混合型模块化多电平换流器功率极限分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 17-25.  
LIAO Min, XU Weihua, YANG Jie, et al. Analysis of maximum power operating region for hybrid MMC considering sub-module balancing constraint[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 17-25.
- [13] MA Z X, CHEN H, CHAI Y L. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.
- [14] 邱欣, 夏向阳, 蔡洁, 等. 全桥型 MMC-HVDC 直流故障自清除控制保护策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(4): 88-94.  
QIU Xin, XIA Xiangyang, CAI Jie, et al. Full bridge-type MMC-HVDC with DC fault clearing protection strategies[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(4): 88-94.
- [15] TAO F, XIE Z J, CHENG J, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [16] 尹太元, 王跃, 段国朝, 等. 基于零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 343-351.  
YIN Taiyuan, WANG Yue, DUAN Guochao, et al. Zero DC voltage control based DC fault ride-through strategy for hybrid modular multilevel converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 343-351.
- [17] XIANG W, LIN W X, XU L, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 董旭, 张峻樛, 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 over head lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48-55.
- [22] 曹帅, 向往, 姚良忠, 等. 风电经混合型 MMC-HVDC 并网的交直流故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 37-43, 49.
- CAO Shuai, XIANG Wang, YAO Liangzhong, et al. AC and DC fault ride-through strategies for wind power integration via hybrid MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 37-43, 49.
- [23] 曹帅, 向往, 林卫星, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 39-48.
- CAO Shuai, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 39-48.
- [24] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.
- XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.
- [25] CUI S, SUL S K. A Comprehensive DC short-circuit fault ride through strategy of hybrid modular multilevel converters (MMCs) for overhead line transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7780-7796.
- [26] 颜湘武, 崔森, 宋子君, 等. 基于超级电容储能控制的双馈风电机组惯量与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 111-129.
- YAN Xiangwu, CUI Sen, SONG Zijun, et al. Inertia and primary frequency modulation strategy of doubly-fed wind turbine based on super-capacitor energy storage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 111-129.

收稿日期: 2020-07-25; 修回日期: 2020-09-08

作者简介:

李国庆(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和柔性直流输电技术;

张林(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: allin2017@163.com

江守其(1991—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术及其仿真建模。E-mail: m15043264368@163.com

(编辑 魏小丽)