DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190769

风电场经柔性直流输电系统故障穿越协调控制研究

张钦智[1]，王 宾[2]，李 琰[3]，刘 超[3]

(1.山东理工大学电气与电子工程学院，山东 淄博 255049；2.清华大学电机系，北京 100084；
3.中国电力科学研究院有限公司，北京 100192)

摘要：当大型风电场经柔性直流输电系统长距离输送时，需解决交流电网故障时导致直流功率过剩及电压上升等问题。传统方法中仅用卸荷电路或改变控制策略都各自存在缺陷，不能够快速、经济、可靠地完成故障穿越。针对以上问题，提出一种投入自调控耗能电阻与通过风场最大功率跟踪减少输送功率相结合的故障穿越协调控制策略。在故障初期投入耗能电阻来弥补控制策略通信延时的问题。其次在引入最大功率跟踪减载后，可适当退出部分耗能电阻，从而避开单一方案的缺点，取得更好的故障穿越效果。最后基于 PSCAD/EMTDC 建立模型，仿真验证了该协调控制策略的有效性。

关键词：柔性直流输电；双馈风力发电；自调控耗能电阻；最大功率跟踪；故障穿越协调控制

Research on fault crossing coordination control of a wind farm via a flexible direct current transmission system

ZHANG Qinzhi[1], WANG Bin[2], LI Yan[3], LIU Chao[3]

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: When output from large wind farms are transported over a long distance by flexible HVDC transmission system, problems such as excessive DC power and voltage rise need to be solved if the AC power grid fails. The use of unloading circuit or changing control strategy has its own shortcomings, so they couldn't finish the fault ride through fast, efficiently, and reliably. Given these problems, a fault-crossing coordinated control strategy is proposed. This combines a self-regulating energy dissipation resistor with reducing transmission power through maximum power tracking in the wind field. At the beginning of the fault, an energy dissipation resistance is put in to compensate for the communication delay of the control strategy. Secondly, after the introduction of maximum power tracking load shedding, some of the energy dissipation resistance can be withdrawn appropriately, so as to avoid the shortcomings of a single scheme and achieve better effect. Finally, the simulation verifies the effectiveness of the coordinated control strategy by PSCAD/EMTDC.

This work is supported by Beijing Natural Science Foundation (No. 20151100094) and State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (No. NYB51201901143).

Key words: VSC-HVDC; double-fed wind power generation; self-regulating energy dissipation resistance; MPPT; fault traversing coordinated control

0 引言

柔性直流输电(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)技术不需要借助外部电源实施换相[1]，非常适合风电场这种相对较弱的电源并网使用[2]。但是迫切需要解决的问题是大规模风电场经 VSC-HVDC 并网的故障穿越问题[3]。

目前解决该问题的方案主要有以下三种：增大 HVDC 变流器容量[4]；增加 HVDC 耗能电路，消耗故障期间多余功率[5-6]；通过控制策略，向风机发送

基金项目：北京市自然科学基金(20151100094)；新能源与储能运行控制国家重点实验室开放基金项目资助(NYB51201901143)

指令使其迅速降低输出功率[7-9]。

文献[4]通过提高直流电容以及网侧变流器的容量，能够保证故障期间可以通过更大的电流。但器件容量的增加是有限的，且会显著地提高成本，文献[5]利用动态泄荷电阻来实现 VSC-HVDC 系统故障穿越；文献[6]提出了应用直流侧可控耗能电阻来维持系统中的能量平衡的方案。但这些采用耗能电路的方案须整体投切电阻，具有灵活度不足，且容量大、成本高等问题。文献[7]提出增加风电场频率来快速减少风电场电磁功率；文献[8-9]提出通过风电机组的惯性支持来实现故障穿越的方案。上述方案的缺点是直流侧过电压上升速度较快，在考虑通信延时的情况下，对响应时间要求非常苛刻。

综上所述，若仅采用耗能电路来平衡故障期间的功率，会有灵活度不足、所需容量大且成本高等缺陷；若仅采用控制策略实现故障穿越又会存在直流侧过电压上升速度相对较快，对风机响应时间要求非常苛刻[10]等问题。针对该问题，本文在已有研究的基础上，提出了投入自调控耗能电阻与风电场的最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)减载相结合的故障穿越控制策略，以弥补传统方案的不足。

1 传统卸荷电路故障穿越方案

1.1 卸荷电路拓扑结构

VSC-HVDC 系统风电并网送出的结构示意图如图 1 所示。其中，双馈风场经输电线连接到升压变压器，然后升压到柔性直流输电系统的送端，柔性直流输电系统通过直流线路输送到其受端电网。其中卸荷电路以负载的形式并联在直流侧高压直流母线上[11]。

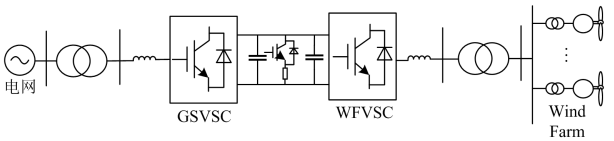

图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system structure

在交流电网发生故障时，系统直流侧会产生过电压。此时可计算出换流器到电网的有功功率输出 P_{GSC} 为

$$P_{GSC}=\frac{U_{GSC}U_{VSC2}\sin\delta}{X} \tag{1}$$

式中：U_{GSC} 为电网侧的电压；U_{VSC2} 为逆变器端口电压；δ为功角；X 为系统的等效电抗。

当电网侧电压下降时，受端换流站送出有功功率会减少，此时风电场输入功率是不变的。因此两侧换流站功率不平衡[12]，系统直流电压随时间变化为

$$U_{DC}(t)=\sqrt{U_{DC}^2(0)+\frac{2}{C_{eq}}\int_0^t(P_{WFC}(\tau)-P_{GSC}(\tau))\mathrm{d}\tau} \tag{2}$$

式中：P_{WFC} 表示送端换流站的输入功率；C_{eq} 表示直流输电线路等效电容；t 为采取控制措施平衡功率的时间。

传统卸荷电阻经全控型电子阀门接于电网侧直流线路，其拓扑结构图如图 2 所示。

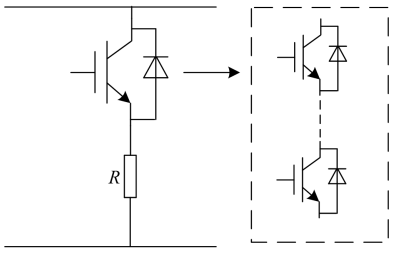

图 2 传统式耗能电路拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of traditional unloading circuit

1.2 卸荷电路功率与持续导通时间

故障期间需投入卸荷电路来平衡多余能量，根据卸荷电阻消耗功率等于风电场全部送出的有功功率，忽略组件本身及线路等损耗[13]，计算出卸荷电阻的阻值为

$$R=\frac{(kU_{dcN})^2}{P_{WFS}} \tag{3}$$

式中：R 为耗能电阻大小；k 为耗能电路触发阈值，U_{dcN} 为直流系统额定电压。

由式(3)可得卸荷电阻的额定功率 P_R 为

$$P_R=\frac{(kU_{dcN})^2}{R} \tag{4}$$

为了避免耗能电阻长时间运行而造成不必要的功率损耗，因此需要设置耗能电阻的连续导通时间。其优势还在于可以解决由过电流引起的误动问题。

$$T_s=\frac{1}{2}C\left[(kU_{dcN})^2-U_{dc\min}^2\right]/(P_R-P_{diss}) \tag{5}$$

式中：T_s 为耗能电路导通时长；U_{dcmin} 为直流线路允许最低电压。

传统的耗能电路要求电阻功率与风场送出的额定功率相同，从而导致成本、占地面积和散热等问题。且耗能电路的脉冲工作模式也会导致功率波动大，影响故障穿越效果[14]。

2 故障穿越协调控制策略研究

实现 VSC-HVDC 风电并网系统故障穿越的关键是保持系统在故障期间传输功率的平衡[15]。故障

穿越协调控制策略是指交流电网侧故障时，投入自调控耗能电阻电路的同时再通过双馈风场的最大功率跟踪来减少风场向柔性直流输电电路输送的功率，通过对两种方案进行联合协调控制，平稳实现故障穿越。

2.1 自调控耗能电阻电路的保护控制

考虑到传统卸荷电路的不足，本文借鉴已有的研究成果[16]，提出一种自调控耗能电阻保护控制，其拓扑结构及控制原理如图 3 所示。此方法将传统的直流耗能电阻分为多个相同的子模块[17] (Sub-module, SM)，由 SM_1 至 SM_n n 个子模块并联组成。因此传统卸荷电阻被平分为 n 小份，每一个子模块能够独立地进行投切。通过在故障期间控制子模块投入的数目，易于调节故障时不同程度的故障电压，从而与最大功率跟踪减载控制相配合，同时也解决了器件直接串联的问题。

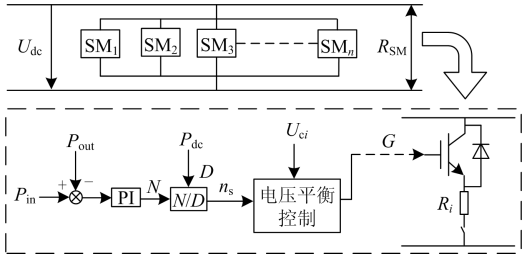

图 3 自调控耗能电阻控制图

Fig. 3 Self-regulating energy dissipation resistance control diagram

投入的每个子模块消耗的额定功率 P_i 为

$$P_i = \frac{U_{\mathrm{dc\,max}}^2}{R_i} \tag{6}$$

计算得每个子模块的电阻 R_i 取值为

$$R_i = n\frac{U_{\mathrm{dc\,max}}^2}{\Delta P_{\mathrm{dc}}} \tag{7}$$

式中：n 为子模块的个数；U_{dcmax} 为故障期间直流侧电压最大值；ΔP_{dc} 为平衡 VSC-HVDC 系统消耗的功率差额。

根据故障程度的不同以及每时刻故障电压大小的不同，会有不同的功率差额，会相应投入 n_s ($1 \leqslant n_s \leqslant n$)个子模块。如式(8)所示，计算故障时应投入的子模块数量 n_s 为

$$n_s = n\left[(P_{\mathrm{in}} - P_{\mathrm{out}})/P_{\mathrm{dc}}\right] \tag{8}$$

式中：P_{in} 为系统直流对交流的输入功率；P_{out} 为电网侧换流站的输出功率；P_{dc} 为 VSC-HVDC 系统直流额定传输功率。

自调控电阻电路的优点在于它可以根据产生的功率差计算当前应当运行的子模块的数量。所以相比于传统卸荷电路，对于只需消耗小功率差额的故障情况，无需安装与风场输出功率相匹配的容量[18]，而且没有投入运行的子模块，也不需要进行冷却，大大降低了成本。

2.2 故障穿越协调控制方法

单纯使用卸荷电路存在的问题，前文已述。若单纯使用 MPPT 降载法，由于通信系统本身的延迟，又会带来控制延误[19]，造成直流电压抬升过高。本文将自调控耗能电阻法与 MPPT 降载法相结合，通过协调配合，在初期通过耗能电阻解决 MPPT 降载法响应慢、电压抬升过高的问题，在 MPPT 法投入运行后，有效降低输入功率，从而可减少耗能电阻配置数量和冷却问题。具体描述如下：

在交流电网故障时，则有每个子模块的过功率值 ΔP_s 为

$$\Delta P_s = U_s I_{\mathrm{send}} - U_s I_{\mathrm{rec}} \tag{9}$$

式中：$U_s I_{\mathrm{rec}}$ 为从每个子模块电路出口测得的受端功率；$U_s I_{\mathrm{send}}$ 为从每个子模块电路入口测得的送端功率。

故障穿越协调控制策略的过程可以分成如下三个不同阶段。

(1) 第一阶段($t < t_s$)：仅耗能子模块投入工作消耗差额功率。

其中 t 为故障发生时刻，t_s 为风场收到减载指令时刻。故障初期考虑到通过最大功率跟踪实施减载存在通信延迟的问题，仅由卸荷电路控制功率消耗。此时盈余功率全部由耗能电阻子模块来耗散，计算投入的子模块数目 n_{s1} 为

$$n_{s1} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_s} \tag{10}$$

式中，ΔP_1 为故障时没有触发减载控制消耗的功率差。

(2) 第二阶段($t_s < t < t_{\mathrm{fin}}$)：最大功率追踪降载处于动态调节过程，能耗子模块消耗差额功率。

此时对于双馈风电机部分的功率[20]如式(11)所示。

$$\begin{cases} P_s = P_e - P_{\mathrm{cus}} - P_{\mathrm{fes}} \\ P_e = \dfrac{P_m - P'_m}{1-s} = \dfrac{P_{\mathrm{mec}}}{1-s} \end{cases} \tag{11}$$

式中：P_s 为双馈风电机定子有功功率；P_e、P_{cus}、P_{fes} 分别为双馈风电机的电磁功率、定子铜耗和定子铁耗；P_m 为双馈电机的输入机械功率；P'_m 为双馈电机的机械损耗功率；P_{mec} 为双馈电机吸收的净机械

功率；t_{fin} 为风场达到新的功率平衡时刻。

为了实现风力机的最大功率跟踪[21-22]，发电机的输出有功功率指令 P_{sref} 可以由风力机的最佳功率曲线和风力机转速 ω_{r} 实时获得。

$$\begin{cases} P_{\text{sref}} = \dfrac{P_{\text{m}}}{1-s} - \Delta P' \\ \Delta P' = P_{\text{cus}} + P_{\text{fes}} + \dfrac{P'_{\text{m}}}{1-s} \end{cases} \tag{12}$$

那么根据式(12)，利用发电机的有功功率指令 P_{sref} 控制 DFIG 的有功输出，最大风能跟踪同样可以实现。

在风场得到故障信号指令时，此时风场开始进行有功减载运行，若此时功率减载量为 ΔP_{sref}，ΔP_2 为在触发最大功率减载运行未达到功率平衡时故障消耗的功率差额，此时投入运行的子模块个数 n_{s2} 为

$$n_{\text{s2}} = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_{\text{sref}}}{\Delta P_{\text{s}}} \tag{13}$$

$$\rho = \frac{\Delta P_{\text{sref}}}{T} \tag{14}$$

式中：ρ 为故障期间风电机组有功减载曲线的斜率；T 为风场达到新的功率平衡所需的时间。

(3) 第三阶段($t > t_{\text{fin}}$)：最大功率追踪降载达到新的平衡状态，仅投入少量耗能子模块来消耗差额功率。

当风场达到新的功率平衡时，风电场有功出力固定。此时换流站输入功率与输出功率的差额较小，由子模块耗能电阻消耗实现，并配合风电场减载控制策略完全实现故障穿越，而且穿越效果更加平稳。ΔP_3 为风场达到新的功率平衡后故障消耗的功率差额。

$$\Delta P_3 = P_{\text{sref}} - P'_{\text{sref}} \tag{15}$$

此时投入运行的子模块个数 n_{s3} 为

$$n_{\text{s3}} = \frac{\Delta P_3}{\Delta P_{\text{s}}} \tag{16}$$

式中，P'_{sref} 为风场达到新的功率平衡后的有功出力。

综上，在故障穿越协调期间可以分成三个阶段，其每部分消耗的总功率 P_{com} 为

$$P_{\text{com}} = \begin{cases} \Delta P_{\text{s}} n_{\text{s1}} & t < t_{\text{s}} \\ \Delta P_{\text{s}} n_{\text{s2}} + \Delta P_{\text{sref}} & t_{\text{s}} < t < t_{\text{fin}} \\ P_{\text{sref}} - P'_{\text{sref}} & t > t_{\text{fin}} \end{cases} \tag{17}$$

电网故障下的系统故障穿越协调控制策略原理图如图 4 所示。在电网正常运行时，直流电压不会超出阈值 $U_{\text{dc\_h}}$，逻辑运行输出值为 $S=0$，此时无需对风电场最大风能跟踪的控制方式进行减载功率运行。若系统交流侧出现故障，直流母线电压超出阈值，逻辑判断模块的输出值 $S=1$，从而启动故障协调控制策略。

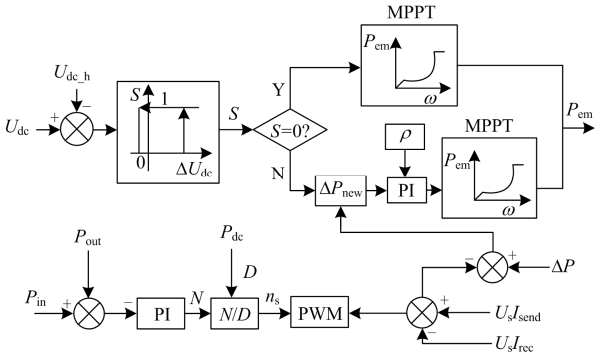

图 4 故障穿越协调控制原理图

Fig. 4 Principle diagram of fault traverse coordination control

图 5 为故障下风电场协调控制原理图。在电网故障情况下，首先投入自调控耗能电阻，以热能的形式耗散盈余功率，实现系统的功率平衡，防止直流电压出现过高的抬升。在躲过通信延时、通信系统接收信号后，风电场 MPPT 有功减载投入运行，通过风机转子侧功率外环[23]的控制策略，改变风场原有的最大风能跟踪曲线，降低 DFIG 的电磁转矩，从而使风电场的有功出力迅速下降[24]，相应投入的耗能子模块数量可以减少。

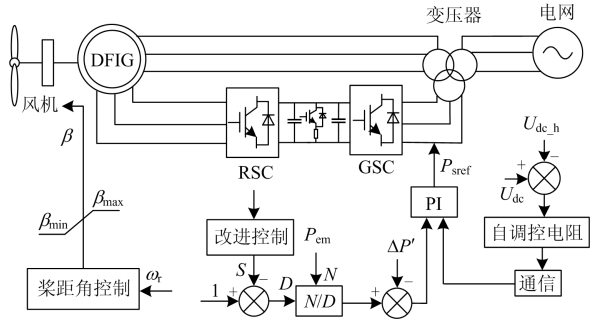

图 5 故障下风电场协调控制框图

Fig. 5 Coordinated control of wind farm under fault

该方法通过两种策略的协调配合，在故障穿越效果和系统成本方面取得了较好的平衡和改进。控制效果方面，解决了故障初期电压抬升较快的问题；同时自调控式耗能电路通过控制投入子模块数量来调节耗能功率，相较于脉冲式工作方式[25]的传统耗能电路，系统的功率和电压波动更小，调节效果更加平稳。成本方面，该控制策略在耗能电路方面不需要太大容量，只需在故障初期将直流侧过电压控制在一定范围内，为引入最大功率跟踪减载控制争取时间，因此可减少耗能模块配置数量；在引入最大功率减载后，可适当退出部分耗能电路，减少不必要的冷却。因此系统成本较低。表 1 总结了本文

所提出方法与传统的耗能电路方法以及 MPPT 降载法在系统成本和故障穿越效果方面的对比。

表 1 本文所提方法与传统方法的对比

Table 1 Comparison between the method proposed in this paper and the traditional method

故障穿越方法	系统成本	故障穿越效果
传统耗能电路法	配置电阻多，耗散功率大，冷却系统投入多，成本高	较平稳，受限于脉冲工作方式，故障期间系统电压波动较大
MPPT 降载法	不需配置耗能电阻和相应冷却系统，成本低	不平稳，故障初期电压抬升大，可能超过阈值
本文所提协调控制方法	电阻配置数量少，耗能功率小，冷却系统投入少，成本适中	整个故障过程非常平稳

3　仿真分析

3.1 仿真参数

为了表明本文设计的协调控制策略的正确性，在 PSCAD 中搭建模型仿真验证，模型采用双端 VSC-HVDC 系统，风电场采用 40 台等值风电机组，其中自调控电阻电路以负载的形式并联在 GSVSC 近直流侧高压母线上。

双馈发电机参数：额定功率为 5 MW，额定电压为 0.69 kV，额定频率为 50 Hz；定子侧电阻为 0.005 4 p.u.，转子侧电阻为 0.006 1 p.u.；定子侧自感为 0.10 p.u.，转子侧自感为 0.11 p.u.。

VSC-HVDC 系统参数：额定直流电压为 ± 200 kV，额定直流电流为 0.5 kA，额定输出有功功率为 200 MW，直流线路长度为 500 km。

单台双馈发电机的额定功率为 5 MW，风场由 40 台等值风电机组成，模型中在 VSC-HVDC 系统部分加入自调控耗能电阻电路，直流电压设置阈值为 1.02 p.u.。

为了验证故障穿越协调控制策略的正确性，4 s 时在受端交流电网侧发生瞬时性三相短路故障，故障持续 0.625 s，电网电压故障期间如图 6 所示，下降至 0.2 p.u.，在 4.625 s 故障切除。为确保本文提出的协调控制的有效性，结果分析忽略换流站启动的过程。

3.2 两种耗能电阻对比

系统稳态情况下，耗能电阻处于闭锁状态。在 4 s 时受端电压下降至约 0.2 p.u.，0.625 s 后故障切除。定义传统耗能电路为方案一，自调控耗能电路为方案二，图 7 给出了两种故障穿越方案仿真波形的对比。

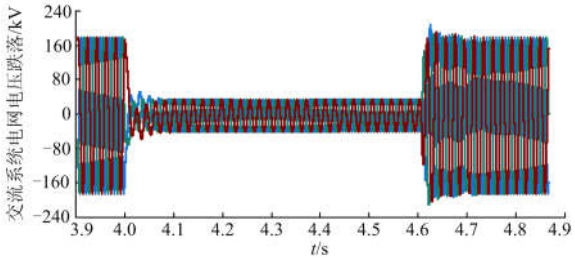

图 6 电网电压跌落

Fig. 6 Voltage sag in power grid

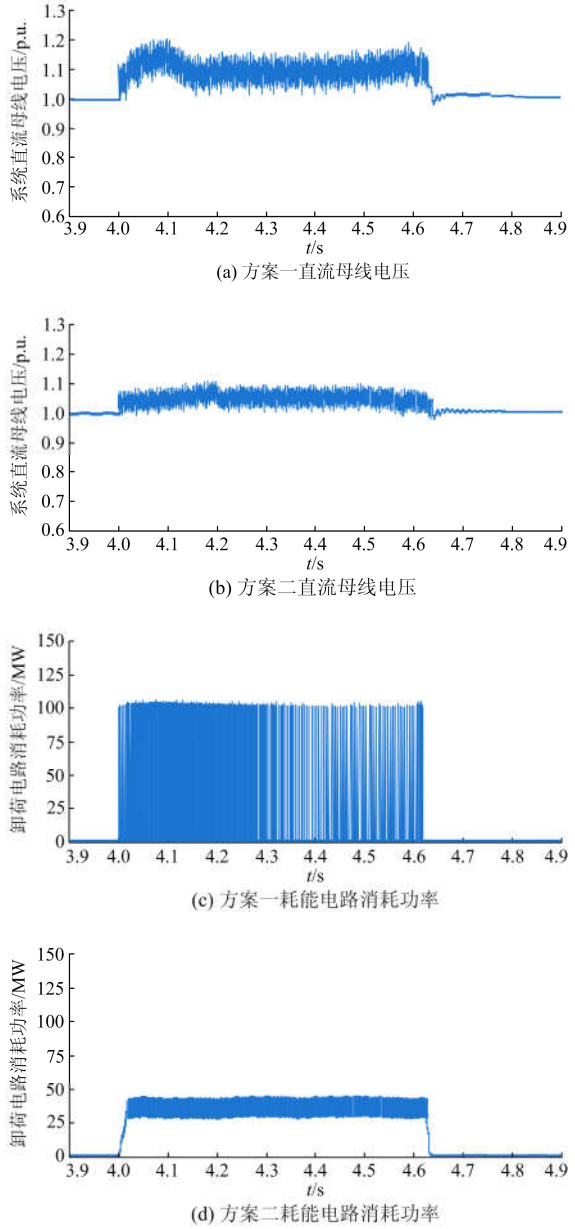

图 7 分别采用两种耗能电路波形对比

Fig. 7 Waveform comparison of two kinds of energy dissipation circuits

可以看出在故障持续期间，图 7(a)为方案一下系统故障期间的直流电压波动情况，受传统式耗能电路工作方式的影响，投切期间会造成较大的功率波动，因此直接影响系统直流电压的故障穿越的效果。而图 7(b)在自调控耗能电阻下，每个触发导通周期内有三个子模块电路投入，这种电路有阶梯式的耗能特点，对比于方案一来说，直流电压较为平稳，且具有更好的故障穿越效果。若模块数量越多，其控制效果越明显。在耗能电路的消耗功率方面，对于整体投切的传统式耗能电路来说，如图 7(c)所示，集中式电阻承受故障期间所有的盈余功率耗散，故障最严重期间更要消耗所有风场送出的功率，因此工作期间会造成大量散热问题，对冷却设备要求较高，且持续升温影响故障穿越效果。而对于自调控耗能电阻如图 7(d)所示，每个子模块电路承受的功率明显少于传统方案，避免了大量散热的问题，且当子模块数运行约近百左右时，每个子模块的消耗功率能降至约几百 kW。

3.3 故障穿越协调控制策略

在同样故障条件下，进行本文提出的协调控制方案。在提出的控制策略下，由图 8(c)能够看出，VSC-HVDC 系统电压在自调控耗能电阻的控制下，故障初期电压会有部分升高，但在加入最大功率跟踪减载后，故障发生期间的电压基本能够实现稳定，且效果明显优于前两种方案，大大改善了故障穿越的平稳性。

由图 8(b)看出，GSVSC 在故障持续期间功率输出能力下降，所以会造成系统功率不平衡。但在故障发生时由于通信系统的传输速度问题，风电场并不能第一时间接收到减载指令，从仿真结果也能验证。但是此时可以通过投入自调控电阻进行耗能，平衡了故障初期的差额功率，改善了不足。在图 8(a)中，风电场收到指令后，在最大功率跟踪减载控制下能够看出对风电场输出功率进行减载运行，并且一段时间后达到平衡状态，此时经减载运行下风电场送出的功率与受端换流站的功率差额，由各个子模块分摊承担消耗，在图 8(d)中可以看出，此时每个子模块消耗的功率更加平稳，相比于单一的方案来说，在配合风场功率减载控制后，耗散功率较小，具有更加明显的优势。

在文中设计的故障穿越协调控制策略下，可以得出 VSC-HVDC 直流母线电压在控制下，不会超过设定的 1.02 p.u.阈值。在故障发生瞬间，投入自调控耗能电阻的同时对风电场输出功率进行减载。风电场达到 MPPT 控制最大化时，由图 8(c)可以看出，直流母线电压比前两种方案更加平稳，验证了该控制方案的优越性。

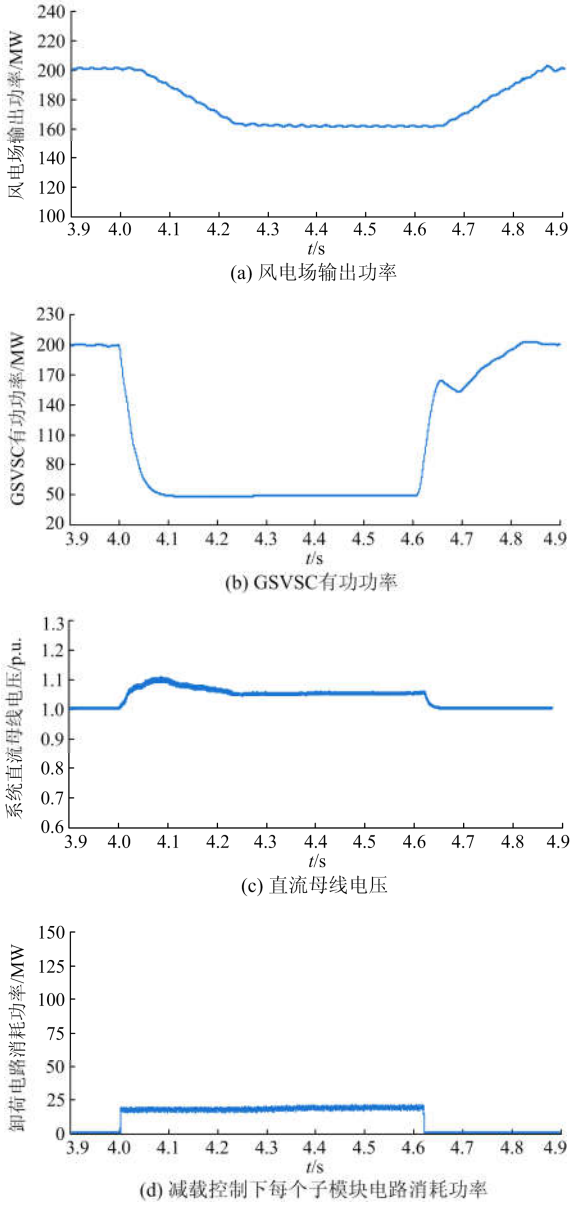

图 8 故障穿越协调控制策略下仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform under fault traversing coordinated control strategy

4 结论

针对风电场经柔性直流输电送出系统电网交流侧发生故障时出现的问题，提出了投入自调控耗能电阻电路与通过 MPPT 降载相结合的协调控制策略。故障初期通过投入自调控耗能子模块来解决 MPPT 降载法因通信延迟引起的电压抬升过高问题；MPPT 降载法投入运行后，按需减少耗能子模块运行数量。整个故障期间具有非常平稳的故障穿越效果，且相较于传统耗能电路，系统成本较低。

仿真结果证明，在协调控制策略下，整个故障期间VSC-HVDC直流母线电压没有超过阈值，且相较于传统方法电压波动更小，证明了该故障穿越协调控制策略的有效性。

参考文献

[1] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.

[2] 边晓燕, 丁炀, 买坤, 等. 海上风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡与抑制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(17): 25-39.
BIAN Xiaoyan, DING Yang, MAI Kun, et al. Subsynchronous oscillation and suppression of offshore wind farm connected with VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 25-39.

[3] 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.

[4] XU L, YAO L, SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 976-984.

[5] 程明, 杜海超. VSC-HVDC 故障穿越控制策略的仿真模型的研究[J]. 电气开关, 2016, 54(4): 27-29, 33.
CHENG Ming, DU Haichao. Research on simulation model of fault traversal control strategy[J]. Electric Switchgear, 2016, 54(4): 27-29, 33.

[6] 李建. 双馈型风电场经VSC-HVDC并网系统的故障穿越控制研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
LI Jian. LVRT control of the double-fed windfarm via VSC-HVDC grid-connected system[D]. Urumchi: Xinjiang University, 2015.

[7] ERLICH I, FELTES C, SHEWAREGA F. Enhanced voltage drop control by VSC-HVDC systems for improving wind farm fault ridethrough capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 378-385.

[8] 韩笑, 王毅, 张志恒. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越能力研究[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(1): 26-31, 51.
HAN Xiao, WANG Yi, ZHANG Zhiheng. Research on fault traverse capability of wind farm based on VSC-HVDC networking[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(1): 26-31, 51.

[9] 王毅, 付媛, 苏小晴, 等. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 150-159.
WANG Yi, FU Yuan, SU Xiaoqing, et al. Research on fault traverse control strategy of wind farm based on VSC-HVDC network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 150-159.

[10] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 风电场交直流混合输电并网中 VSC-HVDC 的控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4781-4790.
FAN Xinming, GUAN Lin, XIA Chengjun, et al. Control of VSC-HVDC in AC/DC hybrid transmission with wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4781-4790.

[11] 王优, 郑泽东, 李永东. 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(5): 1-10.
WANG You, ZHENG Zedong, LI Yongdong. Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(5): 1-10.

[12] 裴昱, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.

[13] 孟永庆, 王健, 李磊, 等. 考虑风机转速限制及卸荷电路优化的永磁同步电机新型低电压穿越协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6283-6292.
MENG Yongqing, WANG Jian, LI Lei, et al. New low voltage ride-through coordinated control strategy for permanent magnet synchronous motor considering fan speed limitation and unloading circuit optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6283-6292.

[14] 李生民, 贾铎, 肖亚敏. 采用新型动态撬棒的 DFIG 低高电压连锁故障穿越技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 79-86.
LI Shengmin, JIA Duo, XIAO Yamin. Low-high voltage chain fault ride-through technology of DFIG with active crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2018,

46(14): 79-86.

[15] 付媛. 基于柔性直流联网的风力发电系统的协调控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
FU Yuan. Coordinated control of the wind generation system integrated by VSC-HVDC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

[16] 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. Coordinated control strategy for grid-connected fault crossing of wind farm based on flexible direct current transmission[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.

[17] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, 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.

[18] 厉璇, 宋强, 刘文华, 等. 风电场柔性直流输电的故障穿越方法对风电机组的影响[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 31-36, 125.
LI Xuan, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Transient analysis and crowbar design of doubly-fed induction generator with crowbar protection under grid voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 31-36, 125.

[19] 朱益华, 郭琦, 李威, 等. 含柔性直流输电系统的电网安全稳定特性和控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 20-26.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Wei, et al. Research on security and stability characteristics and control strategy of power grid with VSC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 20-26.

[20] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832-3842.
TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3832-3842.

[21] 茅靖峰, 吴博文, 吴爱华, 等. 风力发电系统最大功率跟踪自适应鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 80-86.
MAO Jingfeng, WU Bowen, WU Aihua, et al. Adaptive robust MPPT control for wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 80-86.

[22] CHAIBI Y, ALLOUHI A, SALHI M, et al. Annual performance analysis of different maximum power point tracking techniques used in photovoltaic systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 171-180. DOI 10. 1186/ s41601-019-0129-1.

[23] 朱玲, 许翔, 侯玉强, 等. 基于宽频带转子附加阻尼的双馈型风机次同步振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 37-42.
ZHU Ling, XU Xiang, HOU Yuqiang, et al. A suppression strategy for DFIG subsynchronous oscillation based on broadband rotor additional damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 37-42.

[24] 廖勇, 王国栋. 双馈风电场柔性高压直流输电系统的故障穿越运行控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 13-21, 39.
LIAO Yong, WANG Guodong. Fault traverse operation control of flexible HVDC transmission system for doubly-fed wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 13-21, 39.

[25] 蒋云松, 冯剑, 郑权国, 等. 基于 DIgSILENT 的永磁直驱风机低电压穿越仿真及双耗能电阻设计[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 29-36.
JIANG Yunsong, FENG Jian, ZHENG Quanguo, et al. LVRT simulation and dual energy dissipation resistance design for permanent magnetic direct-driven wind turbine based on DIgSILENT[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 29-36.

收稿日期：2019-07-03；　　修回日期：2019-10-15

作者简介：

张钦智(1995—)，男，硕士研究生，研究方向为新能源并网发电、配电网及其自动化技术；E-mail: 568254423@qq.com

王　宾(1978—)，男，通信作者，博士，副研究员，研究方向为电力系统继电保护、电能质量监测分析等。E-mail: binw_ee@mail.tsinghua.edu.cn

(编辑　魏小丽)