

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.008

集群新能源经柔直孤岛送出换流站的功率越限控制研究

王晖¹, 彭依², 杨立敏¹, 张健¹, 李文锋¹, 郭贤珊³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 3. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要:张北地区大规模新能源发电经柔直换流站孤岛送出系统中, 送端换流站容量小于纯新能源电源总容量。为确保换流站功率波动不会短时越限, 文中设计了功率越限快速控制系统, 包括功率越限回降控制系统和紧急虚拟频率控制系统, 对换流站功率越限进行有效预控, 确保换流站安全。首先, 对张北地区新能源发电的运行数据进行分析, 得出张北地区新能源有功短时波动特性, 通过概率统计确定在某一时间尺度内发生的最大波动速率, 为系统参数设计提供支撑。然后, 详细介绍功率越限回降控制系统结构、对新能源功率预控控制过程、关键参数整定原则及回降功率的新能源执行站调用原则等。紧急虚拟频率控制系统作为功率越限回降控制系统在通信中断时的备用。最后, 在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台搭建了换流站主站以及执行站控制器的仿真模型进行验证。

关键词:柔性直流输电; 大规模新能源接入; 孤岛送出系统; 快速功率回降控制; 虚拟频率

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)03-0051-09

0 引言

利用化石燃料产生电能带来的环境问题愈发严重, 化石燃料作为非可再生能源消耗过多, 促使风力发电和光伏发电技术快速发展, 新能源装机大幅增加。截至 2019 年底, 全国风电累计装机容量 2.1 亿 kW、光伏发电累计装机达到 2.04 亿 kW, 占全国电源总装机的 20% 左右。可以预见, 更多地区新能源发电渗透率将有所提高, 可能达到 80% 甚至更高。大规模的新能源集中送出面临很多问题, 目前, “弃风”、“弃光”现象亟待解决^[1-6]。

大规模新能源场站通常处在电网末端, 为了更好地消纳新能源, 充分实现大规模新能源的集中送出, 柔性直流输电技术成为输送电能理想选择之一^[7-10]。我国三北地区具有丰富的风能及太阳能资源, 张北地区现已建立世界首个柔性直流电网工程^[11-14]来输送新能源电力。

由于高电压等级模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)换流站的经济性问题和风光同时性分析^[15-18], 张北柔直电网项目中送端孤岛换流站的设计容量小于所配套的新能源场站的装机容量, 在极端天气下, 可能会出现短时换流器功率越限, 引起换流器过流。因此, 为了确保电网的安全稳定运行, 同时保护造价较高的柔直换流器, 设计了一套控制系统来确保换流器在任何时间都不会出现过流问题。

文中介绍了孤岛换流站的功率越限快速控制系统, 分为功率越限回降控制系统和紧急虚拟频率控制系统。结合工程应用实际, 设计了关键控制参数与控制策略, 有效避免功率越限发生, 旨在避免清洁能源功率波动, 确保换流器及电网安全, 降低对换流器在内的重要设备的损害, 同时减少稳控系统的切机次数。

1 张北地区柔性直流电网结构及新能源波动性分析

1.1 张北地区柔性直流电网结构

张北地区柔性直流电网结构如图 1 所示。张北地区规划建设一个 ± 500 kV 多端柔性直流电网, 包括张北、康保、丰宁、北京 4 个换流站, 张北、北京换流站容量为 3 000 MW, 康保、丰宁换流站容量为 1 500 MW。该网配置直流断路器、直流线路快速保护装置等关键设备, 构建输送大规模风电、光伏、抽水蓄能电站等多种能源的四端环形柔性直流电网。其中, 张北、康保换流站连接纯新能源场站只包括风电场和光伏场, 丰宁换流站连接抽水蓄能电站。

在柔性直流输电孤岛送出大规模新能源的控制类似于海上风电情形^[19-20]。张北、康保换流站为纯新能源送出端, 新能源送出端换流站控制采用向无源电网送电的控制策略, 为新能源机组提供稳定电压, 采用定交流电压和定频率控制^[21-25]。北京换流站作为受端换流站, 与大电网相连, 采取定有功功率和无功功率控制。丰宁换流站作为调压站, 采用定直流电压和定无功功率控制。

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-12-03

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(XTB17201600139)

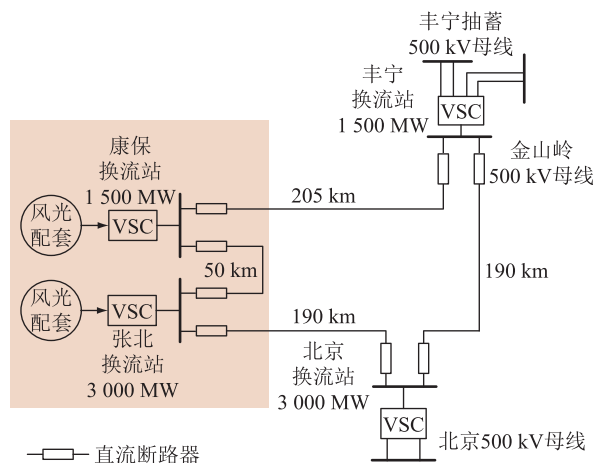


图1 张北柔性直流电网结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of DC grid using VSC-HVDC in Zhangbei

1.2 张北地区新能源短时波动性分析

张北、康保送端换流站的额定容量分别为1500 MW,3000 MW,而2个送端的新能源初步规划容量分别为2250 MW,4500 MW。由于MMC换流器不具备过流能力,为保证功率不超限,功率超限进行有功功率预控,需分析短时间新能源波动。

由于张北、康保区域汇集的风电装机较光伏装机容量占比较大,文中以该区域风电波动特性为例进行分析。因功率超限涉及安全,综合分析能反映波动量的方法^[26-29],选取每一时刻在某一时间尺度(如调度间隔15 min,1 h)内发生的最大波动进行概率统计。假设风电功率序列的时间间隔为 T ,则有:

$$\begin{cases} P_{t1} = \max(P_t, \dots, P_{t+T}) \\ P_{t2} = \min(P_t, \dots, P_{t+T}) \\ \Delta P_{t,t+T} = |P_{t1} - P_{t2}| / P_N \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{t1} 为该时段功率最大值; P_{t2} 为该时段功率最小值; $\Delta P_{t,t+T}$ 为该时段的功率波动最大值; P_N 为额定功率。

通过短时功率波动数据分析可知,1 min间隔风电的绝对波动分布概率密度曲线如图2所示。其中, P 为装机容量,最大波动速度为31.83% P /min,但总体都比较小,有99%以上概率的波动速度都在2.11% P /min以内。以下计算中新能源波动功率最快上升速度 $V_{up,max}$ 设定为30% P /min。

2 功率超限快速控制系统

功率超限快速控制系统的设计分为功率超限回降控制系统和紧急虚拟频率控制系统。紧急虚拟频率控制系统作为功率超限回降控制系统在通信中断时的备用。

功率超限回降控制系统是根据1.2节中新能源

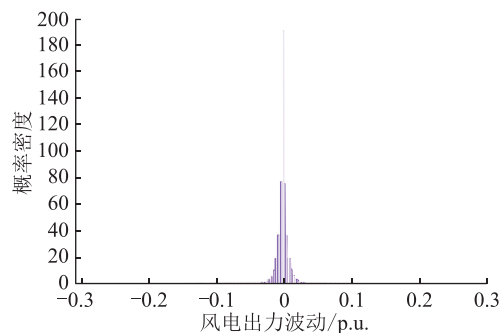


图2 1 min间隔风电的绝对波动分布概率密度曲线

Fig.2 Distribution probability density curve of absolute fluctuation of wind power in one minute

波动特性分析,考虑新能源发电的有功功率以最快波动速度向上爬坡工况,进行有功功率预控。对每次调节中功率调节速度最快的一些新能源电站分轮次发送功率回降指令,使总的下调功率在速度上比最快爬坡速度更快,从而保证换流站总功率始终不超过其额定容量。功率超限回降控制系统通过快速回降新能源出力的方式代替稳控系统,主要以“切机”、减少“切机”量甚至不“切机”来避免换流器功率超限,从而提高系统的安全性,同时减少新能源切机再开机损失的时间和电量。

2.1 功率超限回降控制系统结构

功率超限回降控制系统包含有功快速控制主站与新能源执行子站,如图3所示。

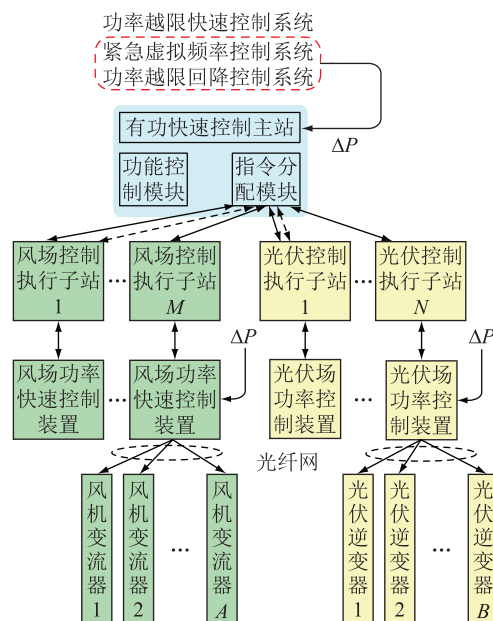


图3 功率超限回降控制系统结构

Fig.3 Configuration of the off-limit power fast control system

其中 ΔP 为指令下发需要回降的功率。张北、康保站有功快速控制主站,主站涵盖两部分功能:一是功能控制模块,二是指令分配模块。主站的指

令分配模块用以接收功能控制模块的命令,并计算控制量的分解结果,将指令下发到执行子站。

在新能源场站部署执行子站接收主站功率回降命令,并分配给风机主控/光伏逆变器,同时将站内当前功率、最大功率上送至有功快速控制主站。

风电/光伏场站功率控制装置接收执行子站调节功率值并分发给新能源控制器,风机变流器/光伏逆变器接收指令并控制。

2.2 新能源执行站的功率快速调节控制

对于风电场来说,风机存在旋转元件,因此风电场执行子站控制器指令不能直接发送至风机变流器,而是快速发送至风机主控。另外,由于风机降功率时转速会快速升高,因此需要加入转速保护逻辑。图4为优化后某地区风电场功率快速调节试验结果,功率下降5%P的速度为660 ms,在700 ms的目标以内。

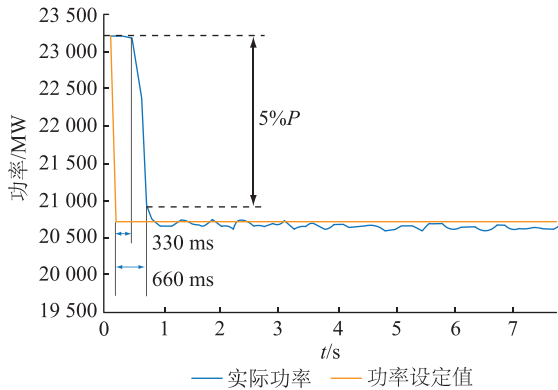


图4 风电场功率快速调节试验结果

Fig.4 The experimental result of the wind farm on fast power regulation

光伏电站协调控制器可直接向各逆变器单元高速群发功率调节指令,逆变器的控制单元接收到指令后,将其有功、无功功率设定值经过功率环调节后输出为控制系统接收的指令,限制或放开逆变器的功率输出^[30-31]。当光伏电站以最大功率运行时,将控制方式改为定功率运行,快速回降整站功率。因光伏电站无旋转元件,有功回降速度相对较快。图5为光伏电站功率快速回降调节试验结果,可见光伏电站有功功率可在30 ms内完成功率回降。

2.3 功率越限回降控制系统策略及参数设定

2.3.1 设计原理及参数设定

对于风电场和光伏电站,风机存在旋转原件,控制较为复杂,需要的最短调节延时也相对较长。以目前速度最快的某厂家风机试验为例,以优化后的结果为标准,从风电场接收到功率调节指令到调节基本完成需要 $100+100+500=700$ ms。功率越限回降控制系统主站包括功能控制模块和指令分配

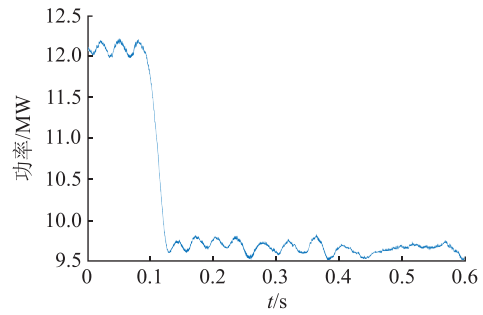


图5 光伏电站功率快速调节试验结果

Fig.5 The experimental result of the photovoltaic power plant on fast power regulation

模块,这2个模块的计算延时记为50 ms,与风场执行站的通信延时记为50 ms,加上风场延时700 ms,总延时为800 ms。以康保站为例,若以换流站额定容量1 500 MW为功率越限控制阈值,则功率越限后,由于延时仍未进行调节,功率继续增加,会造成更大幅度的功率越限。

功率越限回降控制系统阈值设定见图6,根据新能源波动特性分析,考虑新能源场站功率爬坡情况,以新能源波动功率最快上升速度 V_{up_max} 为 $30\% \times P / \text{min}$,考虑到控制时限800 ms,包括系统的控制延时 $\Delta t_{\text{cntrl_sys}}$ 和新能源场站控制延时 $\Delta t_{\text{NewEnergyFarm}}$,可以计算出功率越限回降控制系统理论阈值 $P_{\text{th_theory}}$,即可保证换流站的总功率达到换流站功率限值 $P_{\text{MMC_limit}}$ 刚好不越限。

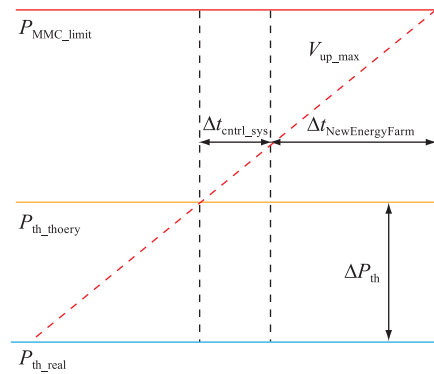


图6 功率越限回降控制系统阈值设定

Fig.6 The threshold setting of the off-limit power fast control system

以康保站为例,功率越限回降控制系统理论阈值为1 494 MW。工程上,通常考虑留有一定的裕量,故功率越限回降控制系统实际阈值应留有裕量 ΔP_{th} ,以保证工程上实现功率不越限,即:

$$P_{\text{th_real}} = P_{\text{th_theory}} - \Delta P_{\text{th}} \quad (2)$$

在功率越限回降控制系统实际阈值的整定中,主要考虑两方面的因素:功率测量误差 $\Delta P_{\text{th_err}}$ 和控制过程中的产生误差 $\Delta P_{\text{th_controller}}$ 。实际阈值 $P_{\text{th_real}}$

中所留裕量 ΔP_{th} 为两者之和,如式(3)所示。

$$\Delta P_{th} = \Delta P_{th_err} + \Delta P_{th_controller} \quad (3)$$

所留裕量中 ΔP_{th_err} 为考虑功率测量误差时所留裕量,由 MMC 容量即输出新能源场站的最大功率乘以误差的系数 ε_{PowerM} ,通常为 0.5%,即:

$$\Delta P_{th_err} = P_{MMC_rate} \times \varepsilon_{PowerM} \quad (4)$$

所留裕量中 $\Delta P_{th_controller}$ 是将 5 个新能源场站控制周期(即 $5T_c$)内以最快速度 V_{up_max} 上升的功率作为整定裕量,如式(5)所示。

$$\Delta P_{th_controller} = 5T_c V_{up_max} / 60 \quad (5)$$

为保证功率越限回降控制系统的有效性以及快速性,新能源场站控制周期 T_c 的整定原则为:通过响应速度较快的 5 个新能源场站的响应时间确定控制周期。根据已有现场实测数据,暂定 $T_c = 300$ ms。张北、康保站情况相同,可采用相同控制策略。张北、康保站功率越限回降控制系统空置策略的关键参数汇总如表 1、表 2 所示。

表 1 张北站功率越限回降控制系统的关键参数 (按现规划的新能源容量计算)

Table 1 Key parameters of the off-limit power fast control system of Zhangbei station (according to the present planning volume of the new energy station)

参数	张北站	
	双极运行	单极运行
越限理论阈值 P_{th_theory}/MW	2 989.2	1 489.2
实际阈值 P_{th_real}/MW	2 954.0	1 454.0
返回阈值 P_{th_return}/MW	2 934.0	1 434.0
控制周期 T_c/ms	300	300
每个控制周期出力下调值 P_T/MW	10	10
新能源波动功率最快上升速度 $V_{up_max}/(MW \cdot min^{-1})$	810	810
功率测量误差 $\Delta P_{th_err}/MW$	15	15

表 2 康保站功率越限回降控制系统的关键参数 (按现规划的新能源容量计算)

Table 2 Key parameters of the off-limit power fast control system of Kangbao station (according to the present planning volume of the new energy station)

参数	康保站	
	双极运行	单极运行
越限理论阈值 P_{th_theory}/MW	1 494.6	744.6
实际阈值 P_{th_real}/MW	1 477.0	727.0
返回阈值 P_{th_return}/MW	1 457.0	707.0
控制周期 T_c/ms	300	300
每个控制周期出力下调值 P_T/MW	10	10
新能源波动功率最快上升速度 $V_{up_max}/(MW \cdot min^{-1})$	405	405
功率测量误差 $\Delta P_{th_err}/MW$	7.5	7.5

2.3.2 实现过程

功率越限回降控制系统在每一个新能源场站控制周期 T_c 中发出一次功率回降指令 ΔP , 确保换流站的总功率不会越限,如图 7 所示。新能源场站出力下调值 ΔP 应满足在一个控制周期 T_c 内,不小于新能源场站以最快速度 V_{up_max} 上升的功率,如式(6)所示。考虑恶劣工况, ΔP 暂定 10 MW。

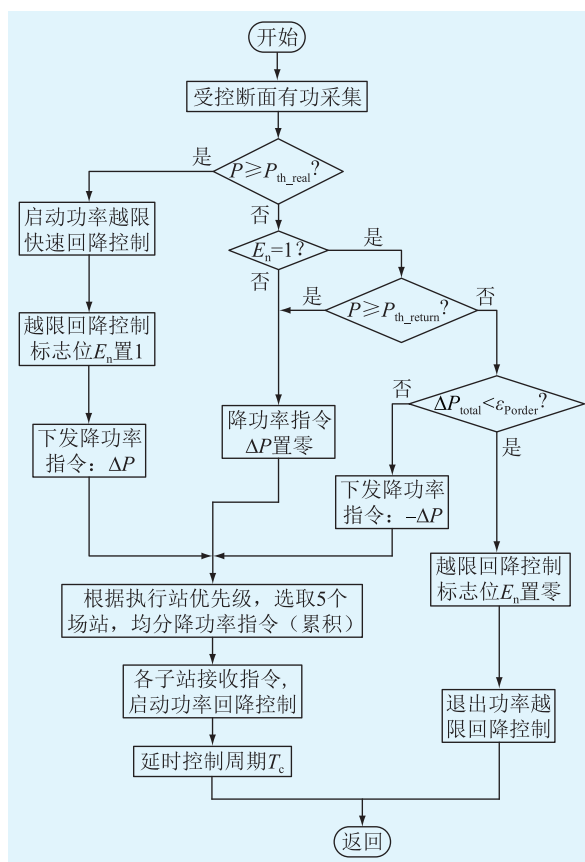


图 7 功率越限回降控制系统逻辑流程
Fig.7 Logic flow chart for off-limit power fast control system

$$\Delta P \geq \frac{T_c V_{up_max}}{60} \quad (6)$$

当测量到受控断面有功功率超过系统实际阈值 P_{th_real} 时,系统启动功率越限回降控制逻辑,将控制使能标志位置 1,并将新能源场站出力下调 ΔP 。在功率越限回降控制系统使能过程中,如果功率再次越限,则继续将新能源场站出力下调 ΔP 。为了防止系统超调,不利于新能源的消纳,系统设置控制逻辑返回阈值 P_{th_return} ,取实际阈值。

P_{th_real} 连续下调 2 次 ΔP 的功率,如式(7)所示。

$$\Delta P_{th_return} = P_{th_real} - 2\Delta P \quad (7)$$

如果功率低于控制逻辑返回阈值 P_{th_return} ,则将新能源场站出力上调 ΔP ;如果受控断面有功功率介于功率越限回降控制系统启动实际阈值 P_{th_real} 和

返回阈值 P_{th_return} 之间,则功率越限回降系统不对新能源场站出力控制。当受控断面有功功率低于阈值 P_{th_real} 且累积降功率 ΔP_{total} 重新归零时,将控制使能标志位置 0,并退出功率越限回降控制逻辑。功率越限回降控制过程示意如图 8 所示。

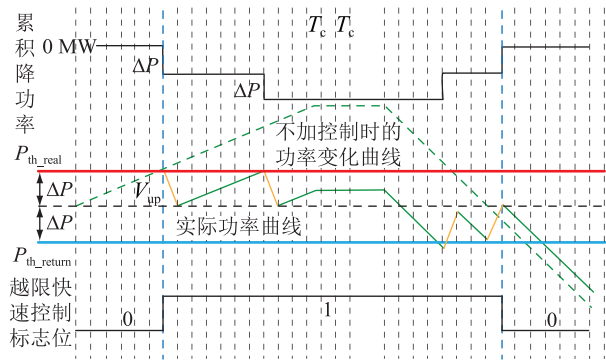


图 8 功率越限回降控制过程示意

Fig.8 Schematic diagram of off-limit power fast control system control process

2.3.3 新能源执行站调用原则

当新能源控制主站生成新能源场站出力调节指令后,根据执行站优先级,选取 5 个场站均分功率调节指令。执行站优先级的确定原则如下:从风电和光伏的装机容量以及换流器的额定容量可以看出,当只有风电在运行时,不存在功率越限问题。此外,由于光伏电站响应速度快,因此,在功率越限回降控制中,优先对光伏电站进行降功率控制,其次对风电场进行降功率控制。光伏电站执行站降功率优先级的确定原则为:(1) 运行状态,选取正常运行的光伏电站;(2) 实发有功功率,优先对实发功率较大的光伏电站进行降功率,且实发功率要求大于 2 MW;(3) 响应速度,优先选取响应速度最快的光伏电站执行功率越限紧急控制。风电场执行站降功率优先级的确定原则类似。

2.4 紧急虚拟频率控制系统的控制策略

送端孤岛换流站的控制采用定交流电压和定频率控制。广域联合发电系统^[25]可以根据功率的变化量计算出虚拟频率,新能源控制主站采用虚拟频率,使新能源交流电网频率发生变化,进行一次调频。

当功率越限快速控制主站通信出现问题时,虚拟频率控制及风机一次调频控制可以作为功率越限回降控制系统的备用控制,称为紧急虚拟频率控制系统。控制逻辑为:当换流站总有功功率达到设定阈值时,立即将虚拟频率控制中的频率设定值设为新能源允许的最高连续运行频率(暂定为 51 Hz);速率限制应设为避免出现系统不稳定的最快

频率上升速度(根据电磁暂态仿真结果暂设为 0.04 Hz/s)。当紧急虚拟频率控制系统启动时,执行站测量孤岛送出系统的电网频率,并进行一次调频控制,进行无通信状态的功率回降调节。考虑张北、康保换流站单双极运行、测量死区、新能源调频死区及新能源一次调频的场站配置比例(配置一次调频的场站总容量占新能源总装机容量的 1/3 考虑)后,双极运行时康保换流站最大安全运行功率阈值为 1 400 MW,单极运行时为 650 MW;双极张北换流站最大安全运行功率阈值 2 850 MW,单极运行时为 1 350 MW。

3 仿真算例

为了验证所提功率越限快速控制策略的有效性,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了张北、康保的主站以及执行站控制器的仿真模型。仿真参数如表 1、表 2 所示。

3.1 功率越限回降控制系统仿真

康保站双极运行时,初始功率为 1 435 MW。每个新能源场站(执行站)的有功功率在 0~10 s 以新能源总功率的 30% P/min , 0.482 1 MW/s 的速度上升,即 V_{up_max} 为 405 MW/min;在 10~15 s 功率保持不变;在 15~30 s 有功功率以 -0.482 1 MW/s 的速度下降。如果不具备功率越限回降控制功能,在 t 为 9.6 s 时,受控断面总有功功率达到 MMC 的额定容量,如果功率继续增加,将威胁柔性直流输电系统的安全运行,如图 9 所示。

当受控断面总有功功率超过功率越限回降控制系统实际阈值 1 477.0 MW 时,启动有功功率越限回降。康保站有功功率越限回降控制策略的仿真结果如图 10 和图 11 所示。

控制逻辑将控制标志位置 1。在场站最大输出功率增加的过程中,所提控制策略输出的累积降功率值不断增加,新能源场站的实际总新能源输出功率最大不超过 1 480 MW。当最大输出功率保持不变时,所提控制策略输出的降功率指令为零。在最大输出功率下降过程中,当总输出功率小于返回阈值 1 457 MW 时,所提控制策略开始回调功率,累积降功率值变小。当累积降功率值降为零时,将控制标志位置 0,退出功率越限回降控制逻辑。此后,新能源场站的实际总输出功率跟随其最大输出功率。康保站响应速度最快的 5 个执行站的响应时间分别设置为 200 ms, 250 ms, 300 ms, 350 ms, 360 ms。从图 11 中 5 个执行站的仿真波形可以看出,采用控制策略,各执行站均能够正确动作。

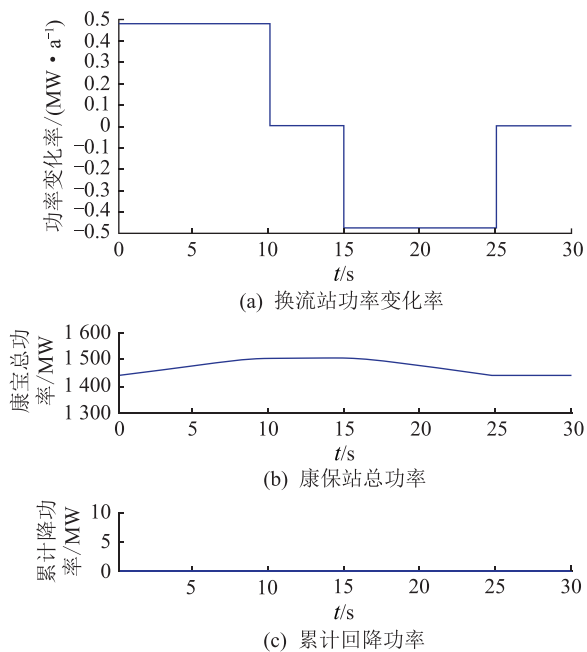


图9 不具备功率越限回降控制功能且
双极运行时康保站仿真结果

Fig.9 The simulation results of Kangbao station in bipolar operation without power off-limit fallback control function

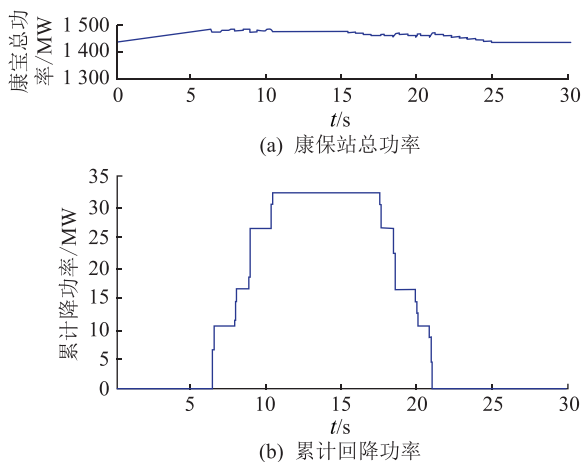


图10 双极运行时康保站功率越限
回降控制主站仿真结果

Fig.10 Simulation results of the control master station of Kangbao station during bipolar operation

3.2 紧急虚拟频率控制仿真

图12为不具备紧急虚拟频率控制系统的仿真效果图、图13为紧急虚拟频率控制系统的仿真效果图。

康保换流站汇集的新能源有750 MW装机容量的电站配置了一次调频,另外1500 MW装机容量的电站没有配置并且以30%P/min的极限速度增加功率。

当无源电网功率越限快速控制通信出现问题时,在没有紧急虚拟频率控制系统的情况下,康保

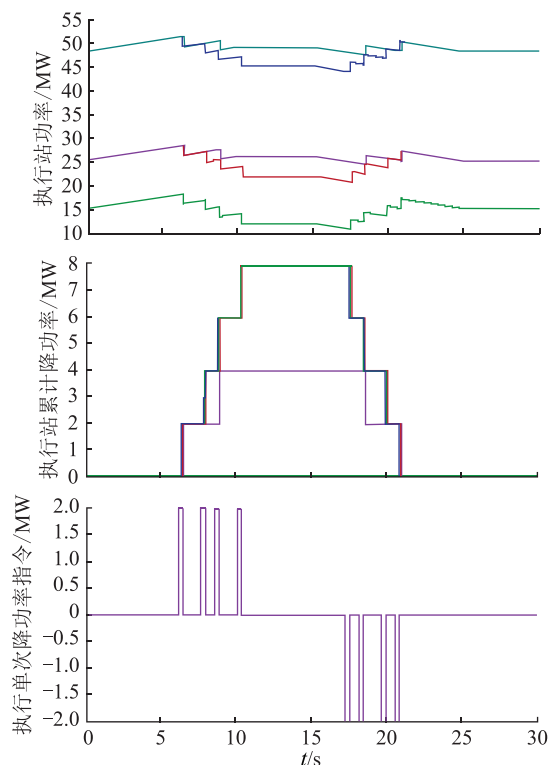


图11 双极运行时康保站功率越限
回降控制执行站仿真结果

Fig.11 Simulation results of Kangbao station off-limit power fast control in bipolar mode of the renewable energy actuator

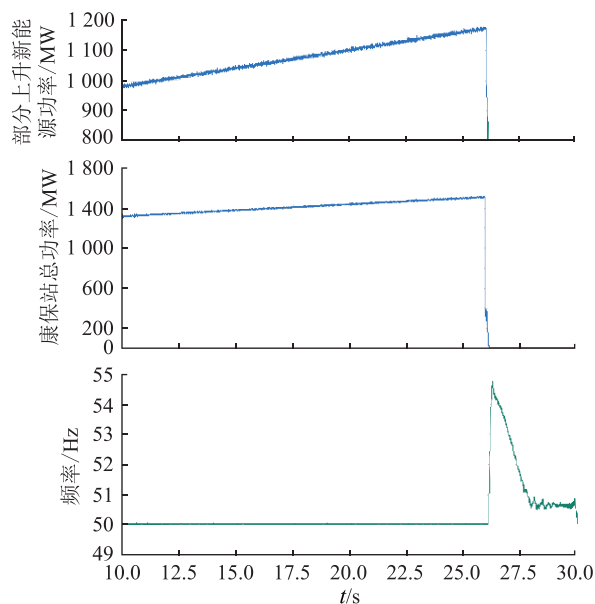


图12 不具备紧急虚拟频率控制系统仿真结果

Fig.12 Simulation results without emergency virtual frequency control

站换流站将在26 s时超过1500 MW的额定容量从而过流闭锁,在有紧急虚拟频率控制系统的情况下,换流站的总功率在1450 MW附近达到峰值并开始下降,从而有效避免过流闭锁。

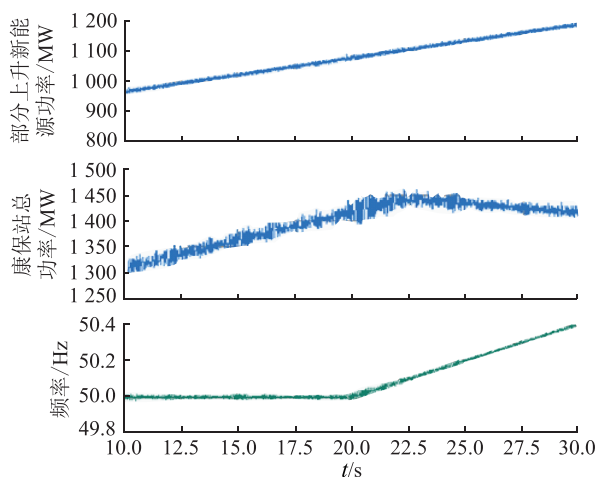


图 13 紧急虚拟频率控制系统仿真结果

Fig.13 Simulation results with emergency virtual frequency control

4 结论

文中针对张北地区大规模新能源发电经柔直换流站孤岛送出系统,设计了广域联合发电的功率越限快速控制系统,得到以下几点结论:

(1) 分析了该区域的新能源波动特点,新能源功率最大波动速度约为 $30\%P/\text{min}$,99%以上概率的波动速度都在 $2.11\%P/\text{min}$ 以内。

(2) 通过分析该区域新能源波动特点、新能源执行站控制能力、通信延时等,设计了功率越限快速控制的策略及控制关键参数。

(3) 紧急虚拟频率系统可作为功率越限快速控制设备通信中断的备用。通过仿真实验验证,可有效避免过流闭锁。

(4) 纯新能源无源电网增加功率越限回降控制后,通过仿真实验对比验证,可有效避免无源电网换流站总功率波动越限的情况发生。

参考文献:

[1] 国家能源局. 国网多举措攻坚清洁能源消纳难题[EB/OL]. (2019-04-12)[2020-6-16]. http://www.nea.gov.cn/2019-04/12/c_137970942.htm.
The National Energy Administration. Several actions taken by national grid to the issue of consuming clean energy[EB/OL]. (2019-04-12)[2020-6-16]. http://www.nea.gov.cn/2019-04/12/c_137970942.htm.

[2] 国家能源局. 2019年一季度可再生能源并网运行情况介绍[EB/OL]. (2019-04-29)[2020-6-16]. http://www.nea.gov.cn/2019-04/29/c_138021561.htm.
The National Energy Administration. The introduction of the operation situation of renewable energy sent on grid in the first quarter of 2019[EB/OL]. (2019-04-29)[2020-6-16]. http://www.nea.gov.cn/2019-04/29/c_138021561.htm.

[3] 国家能源局. 国家能源局2020年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2020-03-06)[2020-6-16]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm.
The National Energy Administration. A transcript of the national energy administration's online press conference in the first quarter of 2020[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2020-03/06/c_138850234.htm.

[4] 姚良忠,朱凌志,周明,等. 高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):36-43.
YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Technical prospect of collaborative optimal operation of high proportion renewable energy power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(9):36-43.

[5] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Analysis of key factors of new energy consumption and research on solutions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(1):1-9.

[6] 周强,汪宁渤,何世恩,等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(10):146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(10):146-154.

[7] 刘洪涛. 新型直流输电的控制和保护策略研究[D]. 杭州:浙江大学,2003.
LIU Hongtao. Study of control and protection strategies for VSC based HVDC system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[8] 张桂斌. 新型直流输电及其相关技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.
ZHANG Guibin. Some topics on novel HVDC and its related technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.

[9] 刘昇. 含VSC-HVDC的交直流电力系统建模、分析与控制相关问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
LIU Sheng. Modeling, analysis and control of AC/DC power system containing VSC-HVDC [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[10] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
XU Zheng. High voltage DC transmission system[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

[11] 郭贤珊,周杨,梅念,等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术,2018,42(11):3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018,42(11):3698-3707.

[12] 梅念,苑宾,李探,等. 接入孤岛新能源电场的双极柔直换流站控制策略[J]. 电网技术,2018,42(11):3575-3582.
MEI Nian, YUAN Bin, LI Tan, et al. Study on control strategy

- of bipolar VSC station connected to islanded renewable power plant [J]. Power System Technology, 2018, 42 (11): 3575-3582.
- [13] 彭春华,刘兵,左丽霞,等. 计及分类需求响应的孤岛微网并行多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(5):60-68.
PENG Chunhua,LIU Bing,ZUO Lixia,et al. Parallel multi-objective optimal dispatch of island micro-grid considering load classified demand response[J]. Power System Protection and Control,2019,47(5):60-68.
- [14] 周京华,张荣,陈亚爱,等. 张北数据港柔性变电站 DC/AC 变流器关键控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(11):128-134.
ZHOU Jinghua,ZHANG Rong,CHEN Ya'ai,et al. Key control strategy for DC/AC converter in flexible substation in Zhangbei data center[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(11):128-134.
- [15] 李斌,何佳伟,冯亚东,等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化,2016,40(21):2-12.
LI Bin,HE Jiawei,FENG Yadong,et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(21):2-12.
- [16] 李斌,何佳伟,李晔,等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4627-4637.
LI Bin,HE Jiawei,LI Ye,et al. DC Fault Protection strategy for the flexible multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(17):4627-4637.
- [17] 李斌,何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):87-95.
LI Bin,HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):87-95.
- [18] 王杨正,陈乐,俞翔. 直流输电工程模块化最后断路器保护策略分析[J]. 电力工程技术,2019,38(2):86-92.
WANG Yangzheng,CHEN Le,YU Xiang. Analysis of protection strategy of modular final circuit breaker in dc transmission engineering [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019,38(2):86-92.
- [19] 肖少华,朱庆龙,杨家豪. 基于时序模拟的孤岛微电网频率及电压质量评估[J]. 浙江电力,2018,37(4):42-46.
XIAO Shaohua,ZHU Qinglong,YANG Jiahao. Evaluation of frequency and voltage quality for islanded microgrids based on time series simulation [J]. Zhejiang Electric Power, 2018,37(4):42-46.
- [20] 梁海东,汪冬辉,王达峰,等. 海上风电工程受电启动带负荷试验新方法的研究与应用[J]. 浙江电力,2019,38(2):62-67.
LIANG Haidong,WANG Donghui,WANG Dafeng,et al. Research and application of a new on-load test method for power-receiving startup of off-shore wind power project [J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(2):62-67.
- [21] 杨方,尹明,刘林. 欧洲海上风电并网技术分析 with 政策解读 [J]. 能源技术经济,2011,23(10):51-55.
YANG Fang,YIN Ming,LIU Lin. European offshore wind power integration; technique analysis and policy interpretation [J]. Energy Technology and Economics,2011,23(10):51-55.
- [22] 李宇骏,徐政. 海上风电场采用柔性直流输电接入电网的控制策略研究[J]. 华东电力,2013,41(5):953-961.
LI Yujun,XU Zhen. Control strategy of grid integration using the flexible DC power transmission in offshore wind farm [J]. East China Electric Power,2013,41(5):953-961.
- [23] 卢智雪,刘天琪,丁媛媛. 海上风电场故障特性及保护配合的研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(10):144-151.
LU Zhixue,LIU Tianqi,DING Yuanyuan. Study on fault characteristics and protection cooperation of the offshore wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2018,46(10):144-151.
- [24] 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.
- [25] 李宇骏,杨勇,李颖毅,等. 提高电力系统惯性水平的风电场和 VSC-HVDC 协同控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6021-6031.
LI Yujun,YANG Yong,LI Yingyi,et al. Coordinated control of wind farms and VSC-HVDC to improve inertia level of power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(34):6021-6031.
- [26] 桑丙玉,王德顺,杨波,等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014,34(22):3700-3706.
SANG Bingyu,WANG Deshun,YANG Bo,et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3700-3706.
- [27] 朱岚康,单宝旭,隋本刚. 光伏电站参与电网频率调节技术的研究[J]. 浙江电力,2019,38(6):1-7.
ZHU Lankang,SHAN Baoxu,SUI Bengang. Research on grid frequency regulation technology of photovoltaic power plant [J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(6):1-7.
- [28] 张介,马赞,张旭鹏,等. 基于聚类分析方法的风电场日前功率预测研究[J]. 浙江电力,2018,37(1):42-46.
ZHANG Jie,MA Yun,ZHANG Xupeng,et al. Research on day-ahead power forecast of wind farm based on cluster analysis [J]. Zhejiang Electric Power,2018,37(1):42-46.
- [29] 李文锋,张健,卜广全,等. 抽蓄电站和经多端柔性直流电网接入的大规模新能源间的协调互补优化控制方案 [J]. 电力系统保护与控制,2017,45(23):130-135.
LI Wenfeng,ZHANG Jian,BU Guangquan,et al. A coordinate complementary optimization control scheme between pumped storage station and large-scale new renewable integrated

through VSC-MTDC [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 130-135.

- [30] 王淑超,段胜朋,王健,等. 光伏电站面向快速频率响应的优化控制技术研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 59-70.

WANG Shuchao, DUAN Shengpeng, WANG Jian, et al. Research and practice of fast frequency response oriented control optimization technology of PV power stations [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 59-70.

- [31] 赵亮,刘友波,余莉娜,等. 基于深度信念网络的光伏电站短期发电量预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 11-19.

ZHAO Liang, LIU Youbo, YU Li'na, LIU Junyong. Short-term

power generation forecast of PV power station based on deep belief network [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 11-19.

作者简介:



王晖

王晖(1985),男,博士,高级工程师,从事电力系统建模、仿真、网源协调技术相关工作 (E-mail:oscar_epri@126.com);

彭依(1990),女,硕士在读,研究方向为新能源并网消纳、电力系统稳定与控制;

杨立敏(1991),男,博士,工程师,从事高压直流输电建模、仿真以及大功率电子变流器技术相关工作。

Fast over-limit power control of converter station sending out new energy in island mode through VSC-HVDC

WANG Hui¹, PENG Yi², YANG Limin¹, ZHANG Jian¹, LI Wenfeng¹, GUO Xianshan³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric University, Beijing 102206, China;

3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: In the islanded control system of the large scale new energy power generation through voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) station in Zhangbei area, the capacity of the converter station at the feed end is less than the total capacity of the pure new energy power source. In order to ensure that the power fluctuation of the converter station will not exceed the limit in a short time, a fast over-limit power control of converter station is designed in this paper, including fallback power control system when exceeding the limit and the emergency virtual frequency control system, so as to effectively pre-control when the power exceeding the converter station and ensure the safety of the converter station. Firstly, the operation data of new energy power generation in Zhangbei area is analyzed, and the short-time fluctuation characteristics of new energy active power in Zhangbei area are obtained. Through probability statistics, the maximum fluctuation rate occurring in a certain time scale is determined, which provides support for the system parameter design. Then, the structure of the power off-limit fallback control system, the process of the new energy power pre-control, the principle of setting key parameters and the principle of calling the new energy execution station for the power fallback are introduced in details. The emergency virtual frequency control system serves as a backup for fallback power control system in case of communication interruption. Finally, the simulation models of the converter station master station and the executive station controller are built on the PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation platform for verification.

Keywords: voltage source converter based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC); sending out large-scale new energy; islanded control; fast power drop back control; virtual frequency control

(编辑 钱悦)