

DOI: 10.7667/PSPC170255

直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施

韩平平, 陈凌琦, 胡迪, 张炎

(安徽省新能源利用与节能重点实验室, 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要: 高压直流输电系统直流闭锁引起的送端交流母线暂态过电压可能影响送端风火打捆交流系统风电机组的稳定运行。针对该问题, 首先分析了直流闭锁引起暂态过电压的主要原因及其对风电机组造成的影响, 然后阐述了直流闭锁动态过电压及保护动作过程, 并利用由 PSCAD 中自带示例 Cigre_Benchmark 改进的双极高压直流输电系统模型仿真分析了直流闭锁的触发方式及其引起暂态过电压的过程机理。通过改进触发直流闭锁的紧急停机策略, 减缓直流闭锁的触发过程, 改变保护措施的触发顺序, 并与安全控制系统配合来抑制送端并网母线的暂态过电压, 以此来保证风电机组的稳定运行。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了风火打捆高压直流模型, 最后通过算例仿真证明了所提方法的有效性。该方法对于风火打捆高压直流输电系统的电压稳定性研究具有一定的参考价值。

关键词: 直流闭锁; 暂态过电压; 并网母线; 紧急停机策略; 风火打捆高压直流输电系统

Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure

HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, ZHANG Yan

(New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The transient overvoltage of converter side AC bus caused by DC block may influence the stable operation of wind-thermal-bundled AC system wind turbines. To solve this problem, this paper firstly analyzes the main reasons of transient overvoltage caused by DC block and its impact on wind turbines. Then dynamic overvoltage caused by DC block and protection operating process are expounded. Besides, the HVDC system model called Cigre_Benchmark in PSCAD is modified, and the modified model is used to simulate and analyze the trigger mode of DC block and the process mechanism of transient overvoltage. The emergency switch off sequence strategy triggering DC block is improved, the triggering process of DC block is retarded, and the trigger sequence of protection measures is changed. And the former strategy works with safety control system to suppress transient overvoltage of the grid-connected bus of converter side, by which the steady operation of wind turbines is guaranteed. The wind-thermal-bundled HVDC model is built based on PSCAD/EMTDC. Finally the effectiveness of the method mentioned is proved by example simulation. This method has certain value for the study of voltage stability of wind-thermal-bundled HVDC system.

Key words: DC block; transient overvoltage; grid-connected bus; emergency switch off sequence strategy; wind-thermal-bundled HVDC system

0 引言

国内许多地区都面临着能源资源与负荷中心分布不均的状况: 一些地区风能等资源丰富但当地总体用电水平较低, 导致电力资源无法就地消纳, 而造成资源的浪费; 而一些经济发达的地区作为负

荷中心却面临能源匮乏的状况。这在客观上要求电力实现大规模、远距离和高效率的输送^[1]。

高压直流输电系统在大规模远距离输电上有着交流输电系统不可比拟的优势。我国为了保障“西电东送、南北互供、全国联网”战略方针的实施, 已先后建成了嵊泗、舟山两个海底直流输电工程以及天生桥—广州、三峡—常州、葛洲坝—南桥等多个±500 kV 高压直流输电系统^[2]。然而随着风电加入直流输电系统, 直流侧闭锁引发的并网母线暂态

基金项目: 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院)开放基金资助

过电压可能会超出风机稳定运行的电压允许范围,造成风机的脱网,严重的情况下可能会导致整个系统崩溃^[3]。因此有必要研究可以抑制暂态过电压的方法,以保证风电机组的安全稳定运行。文献[4]通过增强交流系统强度来抑制直流闭锁引起的暂态过电压;文献[5]根据换流站交流母线电压稳定的 dQ/dU 判据,分析了HVDC不同的基本控制方式对交流系统稳定性的影响;文献[6]基于含有高密度间歇性能源的直流闭锁提出了优化的稳控切机方案。文献[7]重点关注了直流闭锁后暂态过电压下极控滤波器与安控滤波器切机动作的时序关系,提出了安控与极控协调控制策略。以上论文或是从提高交流系统本身稳定性考虑,或是针对数百毫秒到数秒间的过电压措施研究,对于直流闭锁后短时间内暂态过电压的直接抑制措施由于安全保护装置来不及动作而鲜有研究。

本文通过研究直流闭锁的触发机理和改进直流闭锁的触发方式来抑制送端并网母线的暂态过电压,以此来保证风电机组的稳定运行不脱网。依照天广直流系统直流侧的实际参数,基于PSCAD/EMTDC在Cigre_Benchmark标准高压直流输电控制系统的基础上进行修改,建立了送端为风火打捆交流系统的±500 kV双极高压直流输电系统,并且通过仿真验证了该方法的可行性。

1 风火打捆直流外送系统直流闭锁对交流系统影响分析

1.1 直流闭锁对送端交流母线电压影响分析

直流闭锁是指当直流系统发生故障时,保护装置关断换流阀以此来切断直流电流,达到关断直流功率的目的。直流闭锁会引起交流系统暂态过电压,原因主要有两个。

首先,因为直流闭锁后的过电压与交流系统甩负荷有很多类似之处,所以其过电压的原因可以参照交流系统甩负荷进行分析。由于负荷一般呈感性,对发电机的运行起到去磁作用。当某个时刻交流系统因故障甩掉负荷时,负荷的去磁反应随之消失。但由于发电机惯性,励磁绕组产生的磁链不能在短时间突变,所以发电机电势将保持跳开开关前的状态。而由于甩负荷后电流迅速减小到接近为0,所以经过发电机等值电抗和变压器电抗所产生的电压降迅速降低,导致交流母线电压迅速升至接近发电机电势^[8],形成较为严重的暂态过电压。

其次,直流输电系统中换流站在稳态运行时消耗数值约为有功功率的40%~60%,这部分无功功率

由交流母线滤波器提供,可用式(1)表示。

$$Q = P_d \frac{\sin 2\alpha - \sin 2(\alpha + \mu) + 2\mu}{\cos 2\alpha - \cos 2(\alpha + \mu)} \quad (1)$$

式中: P_d 为直流功率; α 为触发角; μ 为换向重叠角。直流闭锁时,直流有功功率随着触发角的增大而减小,而换流站消耗的无功功率随着有功功率的降低迅速减小。由于交流滤波器来不及切除,盈余的无功功率将涌入交流母线,导致交流母线过电压。因为直流系统输送有功功率一般较大,所以这部分无功功率一般也较大,这也是导致其过电压程度较高的主要原因。

交流系统受到直流闭锁影响后过电压的程度和交流系统的强弱也有关系,越强的交流系统受到影响后的过电压程度越低,其强度可以用有效短路比(ESCR,短路容量和无功补偿容量的差与直流功率之比)来衡量^[9]。根据IEEE导则,ESCR<1.5属于极弱系统,1.5<ESCR<2.5属于弱系统,ESCR>2.5属于强系统^[10]。由文献[11-12]的理论可知,在风电直流外送系统中配备较大规模的火电机组可以提高系统强度,抑制暂态过电压水平,此处不再赘述。

1.2 直流闭锁对并网风电机组影响分析

目前运用于风火打捆直流外送的风电机组主要采用双馈型异步发电机,其核心部分由双PWM变换器构成^[13],其中的电力电子器件对系统运行的电压有较高的要求^[14]。正常稳态运行时,PWM变换器中的直流母线电压通过控制环节维持稳定。当网侧电压因闭锁突然升高时,定子磁链中的直流量会在转子电路中感应出较高的电压,导致转子侧出现冲击电流,容易引起转子侧换流器的损坏;同时网侧换流器调制度增大,功率无法送出,反向流入变频器,引起直流母线电压升高,可能会导致直流母线上的电容烧毁^[15]。根据我国《风电场接入电力系统技术规定》要求,当风电场高压侧接入点电压超过额定电压的110%,风电场内高压保护装置动作,断开风机并网联络线^[16]。

直流闭锁引起的交流系统过电压可能对风机的运行产生威胁,进而可能触发风机内部的过电压保护导致风机的脱网。因此,抑制直流输电系统送端交流母线的暂态过电压对于维护风电机组的正常运行及整个系统的稳定是有必要的^[14]。

2 直流闭锁动态过电压过程分析及其抑制措施

虽然直流闭锁引起的暂态过电压与交流系统甩负荷有类似之处,但由于交流侧发电机的电磁暂

态特性难以改变, 所以对过电压的抑制更多要从直流侧的控制下手。

2.1 直流闭锁动态过电压及保护动作过程

整个直流闭锁过电压过程可以分为两个阶段。

阶段一: 直流闭锁命令发出后 100 ms 内, 由于发电机磁链无法突变, 且直流安全稳定装置来不及切除滤波器, 导致暂态过电压水平较高。

阶段二: 在扰动后的 100 ms 到数秒内, 由于直流安全稳定装置开始切除滤波器, 所以电压逐渐回到交流系统可以安全运行的范围内^[8]。

整个过电压与保护动作具体过程如图 1 所示。

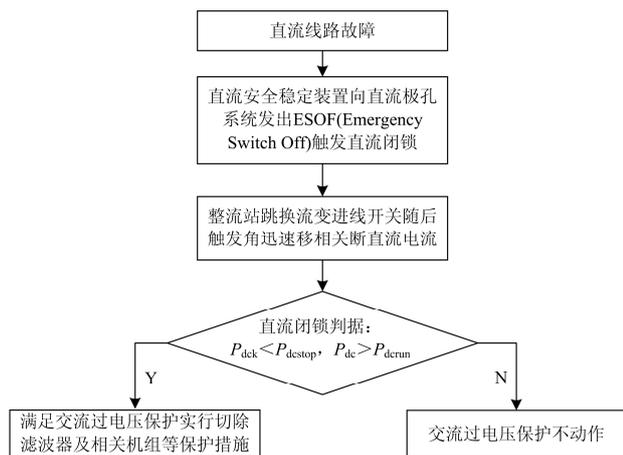


图 1 直流闭锁及保护动作过程

Fig. 1 Process of DC block and protection operating

其中, P_{dck} 为当前测得的极功率, P_{dc} 为 500 ms 前测得的极功率, P_{dcstop} 为极闭锁门槛功率, 而 P_{dcrun} 为极运行功率整定值^[17], 根据文献[18-19], P_{dcstop} 一般整定为每级闭锁后最大容量换流变的 1.1~1.5 倍, P_{dcrun} 整定为每级换流变最小投运功率的 0.5~0.9 倍, 且整个判定过程不超过 20 ms。

2.2 直流闭锁的触发机理

对于第二阶段过电压的抑制主要与滤波器的投切策略有关, 具体内容可参考文献^[6-7, 20-21], 此处不再赘述, 本节重点对动态过电压过程中第一阶段暂态过电压的机理进行分析。

直流闭锁的触发是通过一种叫做紧急停机 (Emergency Switch off Sequence, ESOF) 的方式来实现的。该策略是指当交直流系统发生较为严重的故障时, 保护系统向换流站发出紧急停机命令的同时发出跳换流变压器进线开关的指令, 随后换流站采取快速移相, 或者闭锁, 或者投旁通对闭锁等停止运行方式控制换流阀, 使直流电流与电压相继降为零, 之后切除滤波器来保护系统设备安全^[22]。

一方面整流站的闭锁通常采用“快速移相”方

式, 是指控制装置接收到 ESOF 命令后迅速将整流器触发角移相到 2.09 rad 到 2.62 rad, 使整流站换流器处于逆变状态, 以关断直流电流。当直流电流小于 0.03 p.u 时移相至 1.57 rad 完成闭锁。由于触发角的移相过程非常迅速, 根据式(1), 换流阀的无功消耗将迅速下降, 而滤波器最快也要 100 ms 才能切除^[8], 导致其发出的无功功率大量盈余, 造成了很高的暂态过电压。下文基于 PSCAD 中自带示例 Cigre_Benchmark 改进的双极高压直流输电模型进行具体分析。

图 2 为整流站采用“快速移相”方式的触发角 α (弧度)时的移相过程^[8], 闭锁前后的双极直流功率变化过程如图 3 所示。直流闭锁的动作触发时间设置为 3 s。

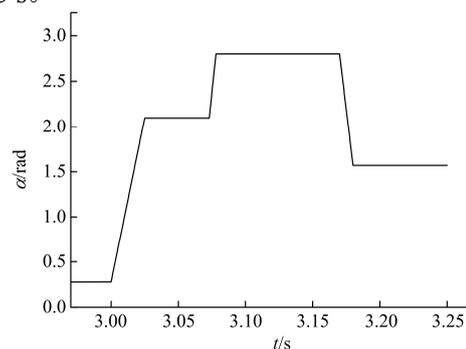


图 2 改进前触发角移相过程

Fig. 2 Unimproved process of trigger angle phase shift

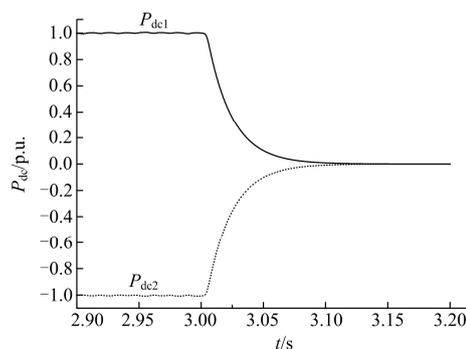


图 3 改进前直流功率变化过程

Fig. 3 Unimproved changing process of DC power

由图 2 看出, 触发角在第一阶段的移相过程非常迅速, 从 0.28 rad 移相到 2.1 rad 时间仅仅为 25 ms, 随之引起的直流功率如图 3 所示下降为 0 只需 56.5 ms, 远比 100 ms 直流保护装置投切滤波器要快, 大量盈余的无功功率得不到平衡, 从而引发了暂态过电压。

另一方面, 换流变压器的铁芯在过电压下迅速饱和, 励磁电感减小, 导致励磁电流增大, 将会消耗更多的无功。由于 ESOF 方式下换流变先于滤波

器切除，所以无法利用其磁饱和特性吸收盈余的无功，不利于过电压的抑制。

2.3 直流闭锁暂态过电压抑制措施

根据 2.2 节的分析，对于过电压的抑制要从改进 ESOF 方式的两个特点入手。

一方面，直流闭锁采用的措施是触发角的快速移相，目的是关断直流电流。而直流输电系统整流侧的定电流控制也是通过控制触发角来完成直流电流实测值对整定值的跟踪，两者的控制量与被控制量是一致的。基于此，本文提出了一种改进触发角快速移相的方法。

具体措施如下：整流侧控制系统接到闭锁命令后发送降低直流电流整定值的命令，使整流侧定电流控制模块中的电流整定值切换至如图 4 方式匀速下降，并设定直流电流整定值 I_{dcref} 从 1.0 p.u. 下降到 0.1 p.u. 的时间为 360 ms。当检测到直流电流下降到 0.2 p.u. 时再执行触发角快速移相闭锁换流阀。改进后触发角的移相过程如图 5 所示延长到 420 ms，此时输送功率如图 6 所示下降为 0 需要 400 ms。这样可以延长换流阀关断时间以使它充分吸收无功，同时在这个时间尺度下保护措施完全来得及动作切除滤波器，对抑制暂态过电压发挥作用。

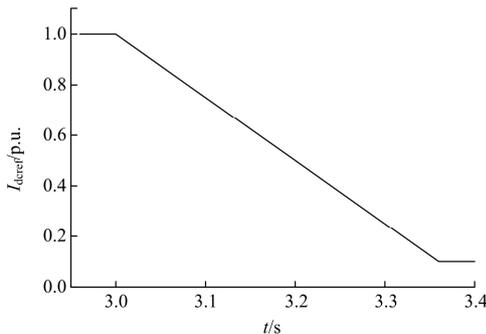


图 4 改进后直流电流整定值变化过程

Fig. 4 Improved changing process of DC current setting

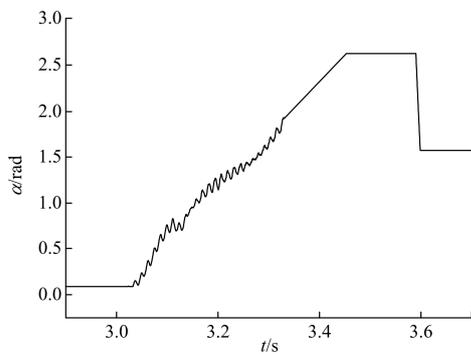


图 5 改进后触发角移相过程

Fig. 5 Improved process of trigger angle phase shift

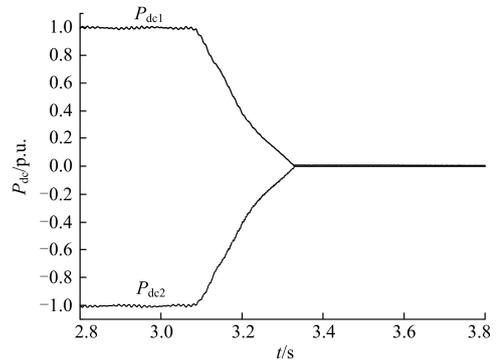


图 6 改进后功率变化过程

Fig. 6 Improved changing process of DC power

对比图 3 和图 6 的直流功率下降过程可以看出，直流闭锁过程有明显的放缓，只要直流闭锁判据设置得当，滤波器有充足的时间在直流闭锁过程中切除，有效抑制暂态过电压。

另一方面，在保护措施发出闭锁信号后，过电压保护先行发出跳滤波器指令，待滤波器切除完成后延时 20 ms 再发跳换流变进线开关指令。让换流变能够充分利用其磁饱和特性吸收过剩无功。

为了让过电压保护装置能够及时动作，一般设置在直流闭锁动作开始后 20 ms 即作出判断并发送指令给投切滤波器装置^[17]。保护装置在接收到直流闭锁保护指令后分组依次切除滤波器。

3 案例分析

在实际系统中，火电机组在风火打捆直流外送系统中占据较大比例，这也成为外送系统抵御较为严重故障的重要保证^[23]。本文基于 PSCAD 电磁暂态仿真软件，参照天广直流系统直流侧的实际参数，送端加入了风火打捆交流系统，建立了如图 7 所示的风火打捆直流输电模型。

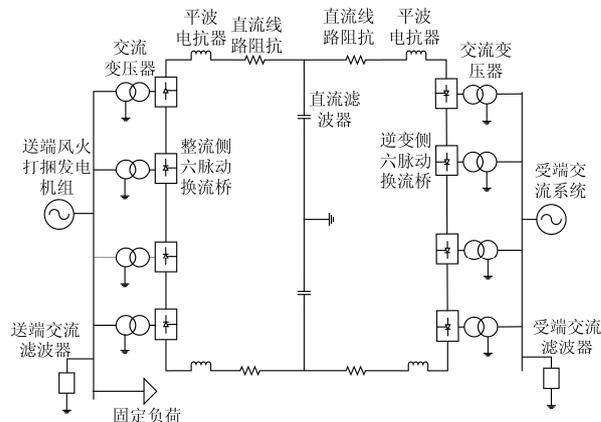


图 7 风火打捆高压直流输电模型电路

Fig. 7 Circuit of wind-thermal-bundled HVDC model

送端系统接线图如图 8 所示: 送端发电系统出力由 6 个火电厂、2 个风电并网点和 1 个负荷组成, 每个火电厂用 1 台额定功率为 300 MW 的同步发电机等值, 每个风电并网用 250 MW 的双馈异步风力发电机等值, 负荷采用 300 MW 恒功率模型。直流输电系统采用双极 ± 500 kV 高压直流输电线路, 正负极分别外送功率 1000 MW 共 2000 MW 功率。仿真中火电厂与风力发电 PCC 点采用相同的接入方案, 均以 30 km 单回线 LGJ-400 架空线路导线接入换流站, 线路单位阻抗为 $0.078 \Omega/\text{km}$, 即输电线路阻抗均为 2.34Ω 。根据判据系统判断直流闭锁不超过 20 ms 的总则及各判据整定值的取值范围, 设定每级 P_{dcrun} 为 960 MW, P_{dcstop} 为 900 MW。经有限容量电源供电网络的三相短路计算, 该系统送端有效短路比为 3.017, 根据本文 1.1 节的描述属于强系统。

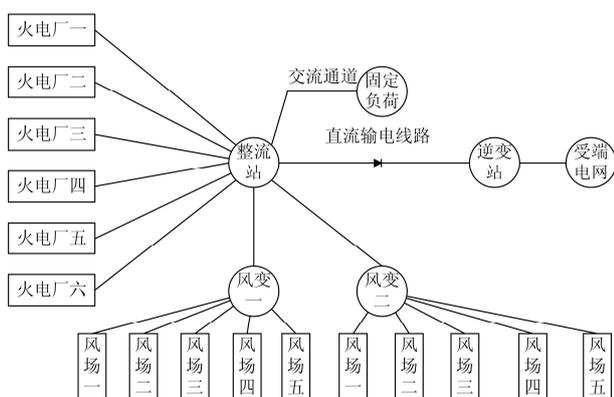


图 8 风火打捆高压直流外送系统接线图

Fig. 8 Wiring diagram of wind-thermal-bundled HVDC system

为了证明本文所提方法的有效性, 故障采用造成过电压程度最为严重的双极闭锁, 直流闭锁触发时间设置为 3 s。送端共配备 6 组滤波器作为无功补偿装置, 采用分组切除的方式, 在接收到闭锁保护信号后 100 ms 开始切除, 每隔 100 ms 切除一组滤波器直至 6 组全部切除。风电机组过电压保护电压测量装置设置在风机出口升压站高压侧母线上, 即风机并网母线 PCC 点上。为方便观察, 风机并网母线电压采用标幺值表示, 基准值为 340 kV。图 9 为改进前采用“快速移相”闭锁方式下风机出口升压站高压侧母线电压 U_{ac} 标幺值变化情况。

由图 9 可以看出, 暂态过电压的峰值出现在 3012 ms, 达到了 1.1476 p.u., 超过了 1.1 p.u.。风机加装过电压保护装置后, 当并网节点电压超过 1.1 p.u.时, 将切除风机与交流母线间的断路器, 风机脱网。断路器 BRK 接收到 1 信号跳开, 0 信号恢复,

其接受信号如图 10 所示。可见断路器在闭锁后跳开, 风机脱网。

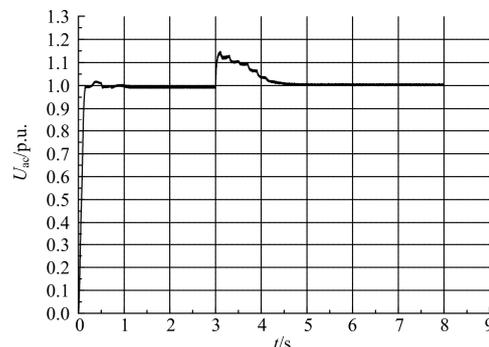


图 9 改进前风机并网母线电压变化过程

Fig. 9 Unimproved changing process of grid-connected wind turbines bus voltage

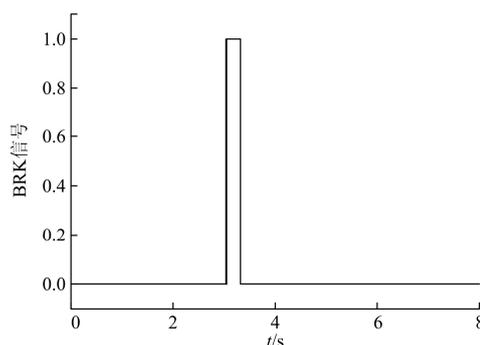


图 10 过电压保护断路器信号图

Fig. 10 Signal diagram of overvoltage protection breaker

图 11 为改进闭锁方式后的交流母线电压 U_{ac} 变化情况, 电压上升速度明显放慢, 暂态过电压的峰值出现在 3522 ms, 滤波器在暂态过电压的上升过程中已经开始切除, 峰值为 1.0949 p.u., 被有效地抑制在 1.1 p.u.以下。

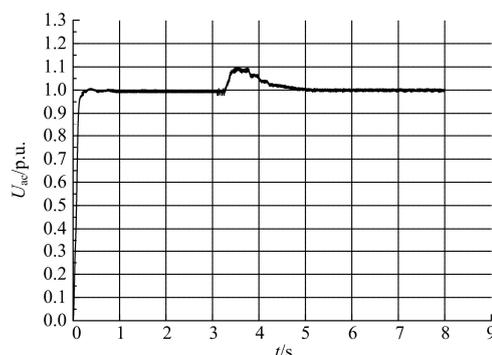


图 11 改进后风机并网母线电压变化过程

Fig. 11 Improved changing process of grid-connected wind turbines bus voltage

图 12 为风电场内高压保护装置 BRK 接受信号

图。可以看出,断路器一直保持 0 信号,即风机没有断开脱网。

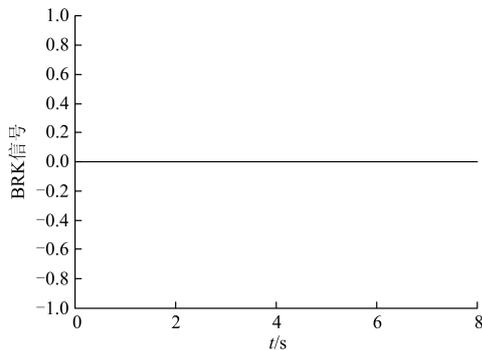


图 12 过电压保护断路器信号图

Fig. 12 Signal diagram of overvoltage protection breaker

由仿真分析可以得出,通过改进高压直流输电系统整流侧的直流闭锁过程,可以显著抑制暂态过电压上升过程,并给予滤波器切除足够的时间,有效抑制暂态过电压,防止风机的脱网事故。

4 结论

1) 含风电机组的高压直流输电在直流闭锁下会造成送端并网母线的暂态过电压,造成连接在母线上的风机存在脱网的可能性,降低风电外送的可靠性。

2) 交流母线暂态过电压的主要原因在于交流滤波器的切除滞后于直流闭锁造成的无功功率盈余,过剩的无功功率涌入交流系统。

3) 直流闭锁是通过断开换流变进线开关并使触发角快速移相来关断直流电流完成的,可以通过改进触发角的移相过程来减缓直流闭锁过程,使得换流阀可以充分吸收无功并使得滤波器的切除可以在闭锁过程的时间尺度范围内。另一方面可以设计控制系统使换流变滞后于滤波器跳开,以利用其磁饱和特性吸收过剩无功。达到抑制暂态过电压的效果。

4) 经仿真验证,本文所提方法可以将风机并网母线暂态过电压抑制在 1.1 个标称电压下,符合风电机组稳定运行的电压范围,防止了其脱网事故。

参考文献

[1] 丁茂生,王辉,舒兵成,等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 63-70.
DING Maosheng, WANG Hui, SHU Bingcheng, et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send HVDC system with wind plants[J]. Power System

Protection and Control, 2015, 43(23): 63-70.

[2] 陈明,相艳会,郭倩雯,等. 天广±500 kV 高压直流输电系统建模及仿真[J]. 中国电力, 2013, 46(6): 30-33, 43.
CHEN Ming, XIANG Yanhui, GUO Qianwen, et al. Modeling and simulation of Tianshengqiao—Guangdong ±500 kV HVDC transmission system[J]. Electric Power, 2013, 46(6): 30-33, 43.

[3] 屠竞哲,张建,刘明松,等. 风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3333-3338.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind-thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3333-3338.

[4] 徐梅梅,李兴源,白家林,等. 交直流并联系统的换流母线电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 6-10, 26.
XU Meimei, LI Xingyuan, BAI Jianlin, et al. Analysis on voltage stability at commutation buses of parallel AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 6-10, 26.

[5] 苏黎. 高压直流输电对交流系统暂态稳定影响的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 15-22.
SU Li. Analysis on influence of HVDC to transient stability of AC system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008: 15-22.

[6] 钟显,樊艳芳,王一波,等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 130-138.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 130-138.

[7] 罗煦之,张健,贺静波,等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2526-2531.
LUO Xuzhi, ZHANG Jian, HE Jingbo, et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2526-2531.

[8] 陈亦平. 直流孤岛运行特性和安全稳定控制策略的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 62-82.
CHEN Yiping. Study on the operating characteristics and safety control measures of HVDC islanded operation system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 62-82.

[9] LIN Weifang, TANG Yong. Analysis of influencing factors of short circuit ratio of multi-Infed AC/DC

- power systems[C] // Preprints of the 5th international conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2015, Changsha, China: 732-734.
- [10] 陈亦平, 陈磊, 叶俊, 等. 发电机高压侧电压控制在抑制云广直流孤岛过电压中的作用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 121-126.
CHEN Yiping, CHEN Lei, YE Jun, et al. Effect of generator high-voltage-side voltage control on mitigating overvoltage in islanded Yunnan-Guangdong UHVDC sending system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 121-126.
- [11] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [12] YOGARATHINAM A, KAUR J, CHAUDHURI I N R. Impact of inertia and effective short circuit ratio on control of frequency in weak grids interfacing LCC-HVDC and DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2040-2051.
- [13] 刘新宇, 姚致清, 陈铁军. 变速恒频双馈风力发电机结构分散化并网控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 29-33, 41.
LIU Xinyu, YAO Zhiqing, CHEN Tiejun. Cutting-in control of the doubly-fed variable speed and pitch wind-power generator based on structure decentralized control[J]. Power System Protection and control, 2013, 41(4): 29-33, 41.
- [14] 王衡, 姚秀萍, 常喜强, 等. 特高压直流故障对风电场送出可靠性的影响及改进措施[J]. 电工电气, 2014(5): 29-33, 41.
WANG Heng, YAO Xiuping, CHANG Xiqiang, et al. Impacts of ultra high voltage direct current fault on output reliability of wind farm and improvement measures[J]. Electrotechnics Electric, 2014(5): 29-33, 41.
- [15] 杨灿. 哈郑特高压直流换相失败对风电影响的仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015: 25-36.
YANG Can. Research on the effect of Hazheng UHVDC commutation failure on wind power[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 25-36.
- [16] MOHSENI M, ISLAM S M. Transient control of DFIG-Based wind power plants in compliance with the Australian grid code[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(6): 2813-2824.
- [17] 任祖怡, 左洪波, 吴小辰, 等. 用于安全稳定控制的高压直流极闭锁判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 41-44.
REN Zuyi, ZUO Hongbo, WU Xiaochen, et al. HVDC pole blocking detection for security and stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 41-44.
- [18] 任祖怡, 夏尚学, 陈松林, 等. ± 800 kV 特高压直流阀组闭锁判别方法: 中国, CN201110327009.X[P]. 2012-06-13.
REN Zuyi, XIA Shangxue, CHEN Songlin, et al. ± 800 kV HVDC pole blocking universal detection: China, CN201110327009.X[P]. 2012-06-13.
- [19] 宗洪良, 任祖怡, 陈松林, 等. 直流输电系统极闭锁综合判别方法: 中国, CN200510123098.0[P]. 2006-07-26.
ZONG Hongliang, REN Zuyi, CHEN Songlin, et al. HVDC pole blocking universal detection: China, CN200510123098.0[P]. 2006-07-26.
- [20] 胡铭, 蔡汉生, 田杰, 等. 云广直流孤岛运行过电压控制措施研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1905-1909.
HU Ming, CAI Hansheng, TIAN Jie, et al. Study of overvoltage control schemes for Yun-Guang UHVDC transmission system in island operation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1905-1909.
- [21] 殷威扬, 杨志栋. 特高压直流无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 50-54.
YIN Weiyang, YANG Zhidong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 50-54.
- [22] 娄彦涛, 吕金壮, 苟锐锋, 等. 直流输电系统紧急停运方式对系统过电压的影响[J]. 南方电网技术, 2009, 2(6): 13-17.
LOU Yantao, LÜ Jinzhuang, GOU Ruifeng, et al. Influence of the ESOF strategy on HVDC system overvoltage[J]. Southern Power System Technology, 2009, 2(6): 13-17.
- [23] 陈树勇, 逢博, 陈得治, 等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 102-107, 122.
CHEN Shuyong, PANG Bo, CHEN Dezhi, et al. Analysis on operating characteristics of the multi-send HVDC systems in Xinjiang power grid[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 102-107, 122.

收稿日期: 2017-02-24; 修回日期: 2017-05-11

作者简介:

韩平平(1981—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事风电场接入电力系统稳定性技术的研究工作; E-mail: LH021211@163.com

陈凌琦(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事计及风力发电的高压直流输电稳定性研究工作。E-mail: 2281537022@qq.com

(编辑 葛艳娜)