

应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越方案

王国英, 贾一凡, 邓娜, Arman Hassanpoor
(ABB (中国) 有限公司, 北京市 朝阳区 100016)

Grid Side Fault Ride Through Solution for Offshore Wind Connection With VSC-HVDC

WANG Guoying, JIA Yifan, DENG Na, Arman Hassanpoor
(ABB (China) Co., Ltd., Chaoyang District, Beijing 100016, China)

Abstract: Wind power generation is one of the most important renewable source, offshore wind energy has become one of the biggest segments in renewable energy sources during the past decade. Utilization of voltage source converter based high-voltage direct-current (VSC-HVDC) technology has enabled more remote installation of windfarms and more power generation. Several VSC-HVDC links are in planning all around the world to connect the remote offshore windfarms to onshore power grids. However, the high penetration of wind energy brings some challenges for system stability, particularly during the fault cases, VSC-HVDC is the solution for these challenges due to its excellent flexibility. This paper summarized the fault ride through solution of different windfarm connection solutions, for VSC-HVDC system fault case is further analyzed and studied. It shows how the DC-side voltage is influenced by excessive energy in the system during the AC-side faults. As a solution, it is proposed to utilize the DC-side chopper to maintain the energy balance in the connected system. The solution presented in this paper enables the fast restart capability after the fault clearance, which is an important criterion for reliable power grid.

Keywords: VSC-HVDC; offshore wind; fault ride through; DC chopper; restart

摘要: 海上风电是可再生能源的重要形式和组成部分, 通过基于电压源换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC) 技术进行风电的远距离接入, 使远离海岸的区域建设风电场成为可能, 另外该技术也具备更大规模风场的接入能力。目前世界范围已有多个应用VSC-HVDC输电系统将海上风电场接入到陆上主电网的工程规划。然而, 大规模风电会对系统的稳定性带来诸多挑战, 尤其需要确保在故障工况下风电场及主电网的稳定性, VSC-HVDC以其优良的灵活性成为应对此类挑战的不二选择。本文对不同风电接入方式下系统的故障穿越

方案进行了总结, 对VSC-HVDC系统的故障穿越性能进行了研究, 分析了故障下系统盈余能量对直流电压的影响, 并提出了应用直流侧可控耗能电阻 (DC Chopper) 来维持系统中的能量平衡的方案。本方案使系统在故障清除后具备迅速重启的能力, 为电网的可靠运行提供了理论支撑。

关键词: 直流输电; 海上风电; 故障穿越; DC Chopper; 重启

0 引言

风力发电是新能源发电技术中最成熟、最具开发潜力的发电方式之一, 海上风电经过若干年的发展也已经成为可再生能源的重要组成部分。2001至2017年, 全球风电装机容量从23.9 GW增长到了539.6 GW^[1], 预计未来将继续保持稳步增长趋势^[2]。风电的新增装机容量中, 海上风电的装机容量占比也在迅速提高, 根据欧洲的统计数据, 海上风电占比在过去十年间从不足2%增长到接近20%^[3]。随着装机容量的增加, 单个海上风电场的容量也在增大, 同时风电场距离海岸线越来越远, 这给风电场接入主电网带来挑战。若采用传统的交流方式送出, 当输电距离超出所谓的临界距离后, 传输过程所产生的大量无功功率使电缆所能传输的有效负荷所剩无几。此外, 考虑损耗和绝缘等因素, 交流电缆的综合造价相对较高^[4]。风电的固有特性带来的电能质量和故障穿越问题也会直接影响电网安全稳定运行^[5]。应用基于电压源换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC) 技术进行风电的远距离接入, 使在远海区域建设风电场成为可能。目前在世界范围已有多个将VSC-HVDC用于大规模海上风电场接入到陆上主

电网的工程规划, 然而如何解决大规模风电对系统带来的诸多挑战仍然是主要的研究课题之一, 尤其是故障工况下的电网安全稳定的要求, 这些需要通过VSC-HVDC优良的控制灵活性来应对处理。

一方面, 交流主网普遍由架空线构成, 瞬时接地是常见的故障形式之一。主电网中任何位置发生故障都会对整个电网产生扰动, 在故障清除过程中风电场并网点的电压会相应波动, 因此风电场需要具备应对由此类常见故障引起的电压波动的能力。另一方面, 相对于常规的交流主网, 风电场是极弱的系统, 一般额定发电容量和输电系统容量相匹配, 这种弱交流系统极易受到主网故障及波动的影响, 引发过电压。在主网电压跌落时, 如通过快速减小VSC-HVDC整流侧输入功率的方法来快速减少VSC-HVDC直流侧的盈余功率, 避免直流侧过电压, 会导致风场侧母线电压的明显增加, 进而导致风机由于过电压脱网或VSC换流器过电压闭锁。

理论上两种方法可以解决此问题: ①向风机发送指令使其迅速降低输出功率^[6]; ②使用可控耗能电阻来耗散盈余功率。第1种方法存在多个问题: 首先直流侧的过电压上升速度相对较快, 可在几十ms内上升至过电压保护动作水平, 因此风机需要在短时间内检测到降功率指令并迅速降低功率输出甚至降为零, 在考虑合理通信延时的情况下, 响应时间要求非常苛刻。其次, 风机类型的多样性决定了风电场响应特性的不确定性, 而对于不同类型的风电场, 电网接入的故障穿越要求是一致的。基于以上原因, 第2种方案是更优的选择, 应用此方案可以使风机基本不受电网侧故障的影响, 极大地减小电网侧故障时风机承受的电气和机械应力, 从而保证了风电场运行的稳定性^[7]。目前欧洲已经建成的用于海上风电场接入的VSC-HVDC输电系统中, 已有BorWin1、DolWin1和DolWin2等项目采用了第2种方案^[8]。

本文总结对比了海上风电场不同电网接入方式的特点, 并主要对VSC-HVDC输电系统在电网侧交流系统故障下的故障穿越方案进行了分析。研究了此种故障时VSC-HVDC的故障输出特性以及系统的盈余能量对直流电压的影响。在故障情况下, 如果直流电压得不到合理的控制, 则系统将无法继续运行, 待故障消失后也不具备快速恢复的能力。本文对应用直流侧耗能电阻(DC Chopper)来维持电网侧电网故障后系统中能量平衡的解决方案进行了深入分析, 讨论了采用此方案后风场侧和电网侧的诸多益处。

1 电网的系统需求及问题描述

在不同国家和地区, 风电接入需遵守相应的接入电网技术规定, 不同电网运营商的接入技术规定通常涵盖故障穿越能力、有功/无功功率调节能力、频率响应能力和电能质量^[9-10]。

各项技术规定对风机的设计提出了额外要求, 另外在风电场规划时需要研究基于不同类型的风机特性如何满足这些规定。

海上风电场的故障穿越能力是指当电网发生不同类型的故障时, 风电场应具备低电压和高电压穿越能力, 即在要求的时间和电压波动范围内保证不脱网、在故障清除后继续正常运行, 其中低电压穿越要求如图1所示。以国家电网公司电网接入标准为例^[10], 低电压故障穿越的基本要求为: ①海上风电场并网点电压跌落至20%标称电压时, 场内的风电机组应保证不脱网运行625 ms; ②海上风电场并网点电压在图1中的电压包络线以上时, 风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行。

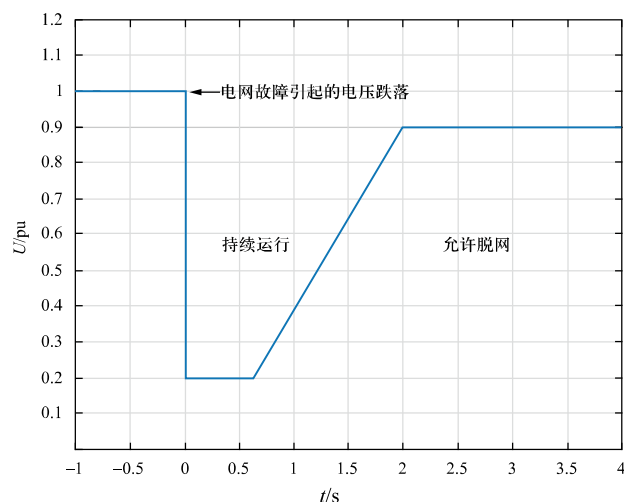


图1 海上风电场低电压穿越要求

Fig. 1 Offshore wind farm low voltage ride through requirement

海上风电的并网方式主要分为高压交流(HVAC)和高压直流(HVDC)^[11], 其中高压直流方式主要指VSC-HVDC。对于HVAC接入, 并网点和风机机端是强电气连接, 所有风机均要满足电网接入技术规定。对于采用HVDC方式接入, 可由HVDC输电系统来满足所有的电网接入技术规定, 风电场交流电压与系统并网点的交流电压之间由VSC-HVDC隔开, 因此风机可专注性能和成本的优化设计。

1.1 高压交流接入

高压交流接入方式通常用于海上风电场规模较小且距离海岸较近的情况, 风机经过汇集线路汇集至海上升压站, 升压后通过海底交流电缆送至陆上网, 如图2所示。

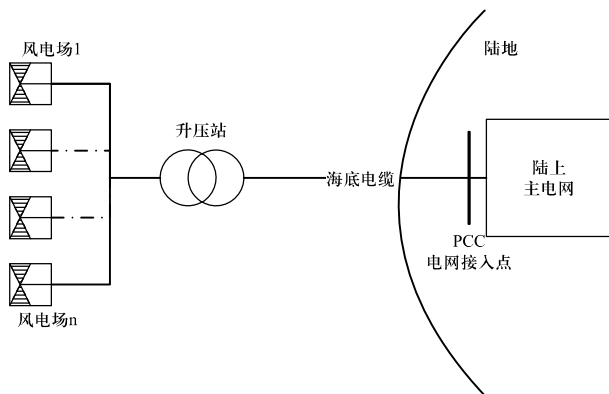


图2 海上风电场通过高压交流送出方案

Fig. 2 Offshore wind farm connection with HVAC

若采用此种接入方式则风机需要严格满足电网接入技术规定, 这对大规模的风电场规划提出了巨大的挑战, 需要不同类型的风机分别考虑各自的低电压穿越解决方案并在每台风机上配置。文献[12-16]对双馈型和直驱型风机的低电压穿越解决方案进行了研究讨论, 综合而言, 对于不太严重的故障可以通过单纯的控制手段来应对, 但对于严重故障必须通过风机的辅助设备或者在输电系统增加补偿设备来应对。这对风机本身的设计以及风电场的整体规划提出了额外要求, 与此同时还需考虑海上风机所面对的诸多限制, 如极端环境和有限的安装空间等。

1.2 高压直流接入

高压直流接入方式通常用于海上风电场规模较大且距离海岸相对较远的情况, 风机经过汇集线路汇集至海上换流站, 通过海底直流电缆送至陆上网。采用VSC-HVDC作为风电接入电网的解决方案, 相当于在风电场和电网之间设立了一道防火墙, 电网与风电场解耦“隔离”运行, 电网的故障以及扰动等均交由VSC-HVDC来应对, 风电场设计可专注于提高效率降低成本等方面, 这将极大优化系统的总体规划和设计。另外多电平换流器具有优良的电能质量性能^[17], 满足电网接入要求。

VSC-HVDC具有快速开关特性及智能控制系统,

能够应对各类型交流故障及扰动。另外, VSC可在半导体器件能力范围内控制其输出电流, 从而使故障电流可控。故障消失后, 系统可以迅速恢复有功和无功输出至故障前状态。

本文将主要研究采用VSC-HVDC接入时电网侧故障下风电场的故障穿越方案。

2 故障过程分析及方案介绍

系统在电网侧发生故障后, 直流侧会产生过电压。VSC的有功功率传输由式(1)给出:

$$P_v = \frac{U_1 \times U_2 \times \sin \delta}{X} \quad (1)$$

式中: P_v 为从换流器到电网的功率输出; U_1 为电网电压; U_2 为换流器端口电压; δ 为功角; X 为系统等效电抗。

从式(1)可知, 当电网侧电压幅值跌落时, VSC-HVDC所能输出的有功功率也会减少。此时, 如前所述风电场的功率不能快速响应, 在百ms时间尺度上可认为风电场输入功率 P_s 是不变的。若忽略系统的损耗, 则直流侧电压变化为:

$$\Delta U_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C_{eq}} \int_{t_0}^{t_1} (P_s - P_v) dt} \quad (2)$$

式中: C_{eq} 为直流系统的等效电容, 由电缆电容、直流侧电容以及换流阀电容组成; t_0 为故障发生时刻; t_1 为采取控制措施平衡功率时刻。

如不采取任何措施, 系统的过电压将会继续发展进而导致闭锁跳闸, 失去故障后恢复的可能性。若在 t_1 时刻采取措施进行功率平衡, 系统将维持动态稳定, 故障消失后VSC可迅速恢复功率传输。

2.1 盈余功率平衡方案

电网侧发生故障时, 风电场注入功率在一定时间内保持不变, 需要输电系统自身具备平衡盈余功率的功能, 最直接的解决方法是布置可控耗能电阻。此电阻有几种可行的设置方案, 文献[18]提出直接在风场换流器交流侧集中布置可控耗能电阻(AC Chopper)的方案, 文献[19]对DC Chopper的应用进行了研究。图3为这2种方案的耗能电阻位置示意图, 其中直流侧布置时可以放置于风场侧换流器直流出口处, 也可放置于电网侧换流器直流出口处。下面是几种布置方式的详细介绍。

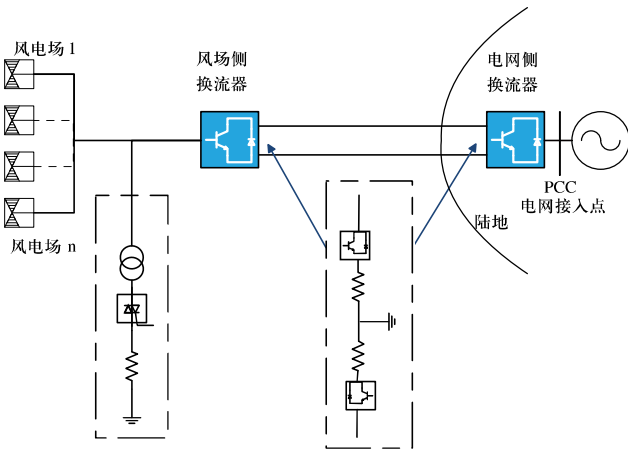


图 3 耗能电阻布置示意图
Fig. 3 Chopper location

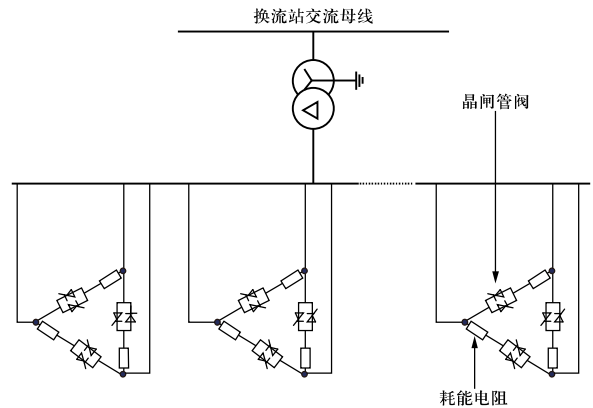


图 4 交流汇集母线集中布置耗能电阻
Fig. 4 AC Chopper at windfarm converter bus

2.1.1 在风场换流器交流侧集中设置耗能电阻

如图4所示，若干组由晶闸管控制的耗能电阻经过变压器连接到换流站交流母线上，当发生直流侧或者受端交流侧故障时，根据直流电压和直流功率水平分组投切以平衡盈余功率^[18]。

2.1.2 在直流侧集中设置耗能电阻

若在风场侧换流器直流出口处布置耗能电阻，同样需要在平台上新增设备，因此不推荐该方案。在位于陆上的电网侧换流器直流出口处部署耗能电阻是合理的方案，具体系统拓扑如图5所示，风电场通过

VSC-HVDC系统接入主电网，DC Chopper布置在位于陆上的电网侧换流器。当受端电网交流侧发生故障时，根据直流电压水平投切DC Chopper以平衡盈余功率。

2.2 耗能装置方案对比

目前AC Chopper与DC Chopper在实际工程（含在建）中均有应用。然而由于其所选设备以及电路特性，两者在投切策略、控制逻辑以及耗能效果上存在较大差异。

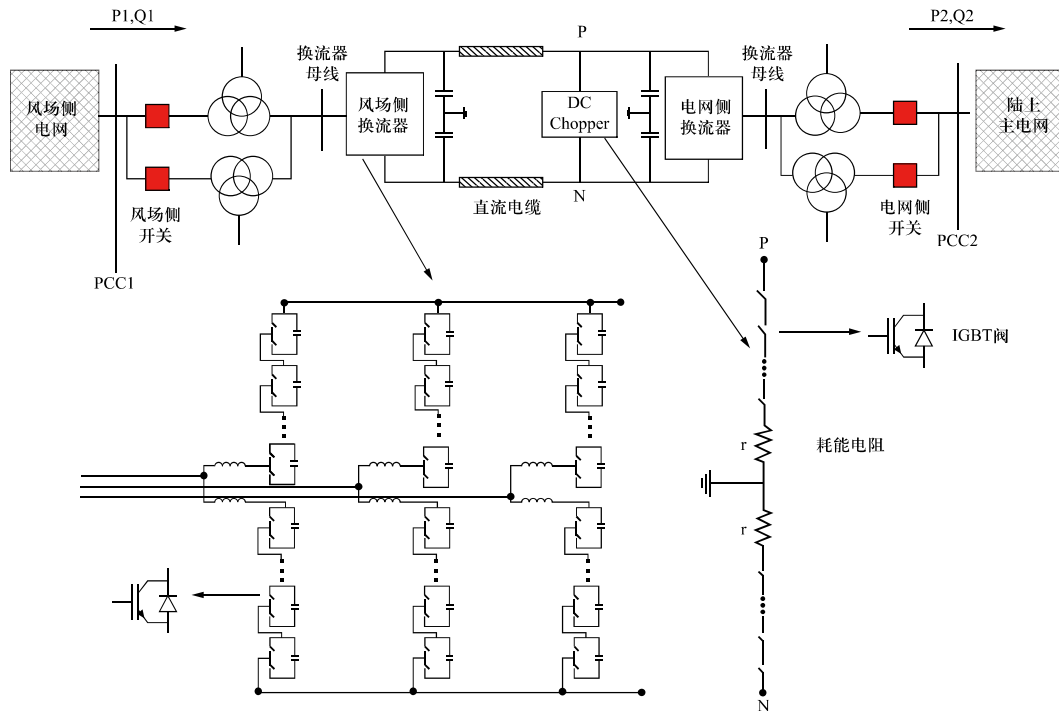


图 5 连接风电场和电网的VSC输电系统及DC Chopper
Fig. 5 Windfarm connection with VSC system and DC Chopper

AC Chopper如图4所示, 包含晶闸管阀、耗能电阻、变压器以及必须的交流断路器等设备。AC Chopper的主要优势体现在设备制造难度小, 尤其是低电压的晶闸管阀目前技术门槛较低。

然而, 考虑高压直流大容量的特点以及交流侧接入电压为220 kV及以上, 必须在低电压的晶闸管阀与交流母线间接入降压变压器将电压降到110 kV或以下, 否则晶闸管阀难以设计制造。降压变压器及其相应的断路器等设备使得海上平台尺寸明显增加, 这不仅增加平台设计难度和投资, 还会极大增加平台建设、运输和安装风险。同时, 变压器长期运行还将产生额外的损耗。

晶闸管不是全控型器件, 电阻的投入虽然是可控的, 但退出必须等待电流自然过零点, 这会导致最大为半个周波的退出延时, 难以做到盈余功率与耗能的精确匹配, 给系统带来不必要的扰动并影响故障后的恢复过程。为了减小这种扰动, 必须将AC Chopper分成若干组, 采用类似传统直流系统中交流滤波器的投切方法, 分段分组投切。这种设计不仅控制复杂, 更

重要的是设备分组将增加额外的空气净距, 设备总尺寸将增加。另外, AC Chopper是交流设备, 必然涉及三相布置问题, 相间距还会进一步增加设备的尺寸。综上, AC Chopper方案对于系统技术性能、平台设计制造、以及整个工程的经济性和风险控制, 都带来了极大挑战。

DC Chopper如图5所示, 包含高压直串型IGBT阀和耗能电阻等设备, 其主要存在的难点是高压直串型IGBT阀制造难度较高, 目前只有个别供应商掌握其设计制造技术。相较于AC Chopper, DC Chopper的技术优势则比较明显。因其为直流侧设备, 不需要三相布置且不需要额外的降压变压器, 所以总体设备投资和占地都大大减小, 尤其是DC Chopper可以布置在陆上换流站, 由此海上平台可节省大量宝贵空间。另外, IGBT是可以高速开关的全控型设备, 可以快速精准控制耗能, 做到功率盈余与耗能的精确匹配, 使系统恢复速度更快。

本节所述AC Chopper与DC Chopper的技术经济性对比详见表1。

表1 AC Chopper与DC Chopper技术经济性对比
Table 1 Technical and economic comparison of AC Chopper and DC Chopper

	AC Chopper	DC Chopper
优势	低电压晶闸管阀技术门槛低	1) 设备数量少, 且仅需一相 2) 稳态损耗小 3) 不需设置在平台上, 减小平台尺寸 4) 盈余功率与耗能精准匹配, 系统波动小, 恢复时间短
劣势	1) 设备数量多, 且需要三相 2) 稳态损耗大 3) 占地大, 导致平台设计制造困难, 运输安装风险大 4) 盈余功率与耗能不匹配, 系统波动大, 系统恢复时间长	IGBT直串阀技术门槛高
总结	技术门槛低, 技术经济性差, 项目施工运行风险高	技术门槛高, 技术经济性好, 项目施工运行风险小

2.3 DC Chopper的参数选择及控制逻辑

DC Chopper的电阻值由式(3)得出:

$$R_{\text{chopper}} = \frac{U_{\text{rated}}^2}{P_{\text{max}}} \quad (3)$$

式中, P_{max} 由考虑最严重交流侧故障时电压跌落后的输送功率和系统额定输送功率的差得出, 本例中考虑三相接地故障且残压为零的理论极值, 即 P_{max} 为输电系统额定功率值。

DC Chopper的控制逻辑如图6所示, 直流侧电压 U_{dc} 为控制对象, 当电压(标么值)超过一定值(本例中取1.15)后DC Chopper将被触发, 能量经由电阻器

耗散, 直流侧电压回落, 当电压(标么值)回落到一定值(本例中取0.95)后DC Chopper将被关断。此过程将在故障持续期间不断循环, 直至故障消失后DC Chopper完全退出, 系统恢复正常运行。

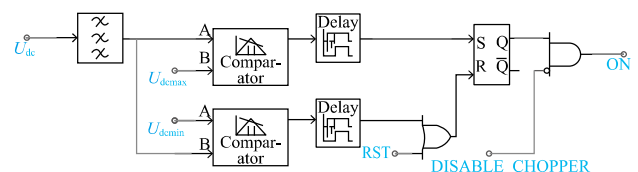


图6 DC Chopper控制逻辑图

Fig. 6 DC Chopper control logic

2.4 DC Chopper的其他辅助功能

DC Chopper除了可以应对逆变侧电网故障时的盈余功率问题,也可以应用在其他工况下进行功率或者电压的紧急控制。例如,对于电网侧换流器而言,一般情况下是作为直流电压控制站运行,但在紧急时可以将输出功率迅速减小到零甚至反转功率方向。在此工况下,盈余功率可以通过DC Chopper耗散掉,这使系统具备了传统的交流接入方式无法实现的快速频率响应以及阻尼控制功能。另外,对于一些扰动和故障导致的暂时性过电压,也可投入DC Chopper对其进行抑制。

3 仿真与分析

为了验证本文提出的基于DC Chopper的海上风电通过VSC-HVDC接入电网的低电压故障穿越方案,以图5所示的系统结构和图6所示的控制逻辑在PSCAD/EMTDC中搭建了仿真系统进行验证。

根据前面的分析,考虑到直流侧的过电压上升速度相对较快,风机需要在短时间内检测到或者从稳控系统收到降功率指令,并迅速降低输出功率甚至降为零,在考虑合理检测时间和通信延时的情况下,此响应时间要求非常苛刻。其次,风机类型的多样性决定了风电场响应特性的不确定性,对于严重故障例如靠近换流站的交流系统三相接地短路,会导致系统能送出的功率降到极低水平,这要求所有风机短时间内同时将功率降为零,这在实际中是不现实的。基于以上原因,本例中的故障工况均认为风电场注入到VSC-HVDC系统中的功率不变,所以不对风机本身故障穿越能力做特殊要求。

仿真模型具体参数如下,其中故障残压及其持续时间与风机接入电网技术规定的低电压穿越要求对应:

- 1) 风场侧换流器为V-F控制模式;
- 2) 直流侧电压由电网侧换流器控制;
- 3) 故障前系统稳态运行,所有电气运行参数均为1 pu;

- 4) 故障点定为靠近电网侧换流器PCC点;
- 5) PCC母线处残压0.2 pu;
- 6) 故障持续时间650 ms。

以下针对系统故障穿越能力对比分析,对于最严苛的三相故障,将不投入和投入DC Chopper两种工况进行了仿真,并对结果进行了分析总结。

3.1 三相短路故障不投入DC Chopper

图7~图8为仿真结果波形。故障前,系统正常运行,风电场送出功率与直流输电系统的输送功率均为1 pu,当 $t=0.12$ s时电网侧靠近换流站处发生三相短路故障。两图分别显示了两侧换流器母线三相电压、换流器母线三相电流、换流器母线功率(送出为正)和直流电压。

如图7所示,风场侧换流器在经历直流侧过电压后闭锁并断开交流断路器,此种情况下输电系统不再具备重启的可能,系统未能穿越故障。

如图8所示,电网侧三相故障后PCC点交流电压跌落,PCC点电流在故障中有一定程度的增大但是在可控范围,有功功率输出随着电压的跌落几乎为零,经过直流侧过电压过程后电网侧换流器闭锁。仿真结果表明输电系统在主电网故障清除后未能成功穿越。

如前所述,当有功功率由于电网侧故障不能送出时,若风场侧换流器不能相应减少功率馈入,系统中的功率出现盈余,盈余功率只能由系统中的电容储存起来,导致电容不断充电而产生过电压过程。除非采取其他保护性措施应对此种情况,否则当直流系统的电压升至一定水平时就会导致过电压跳闸,风场侧和电网侧换流器相继闭锁并断开交流断路器。

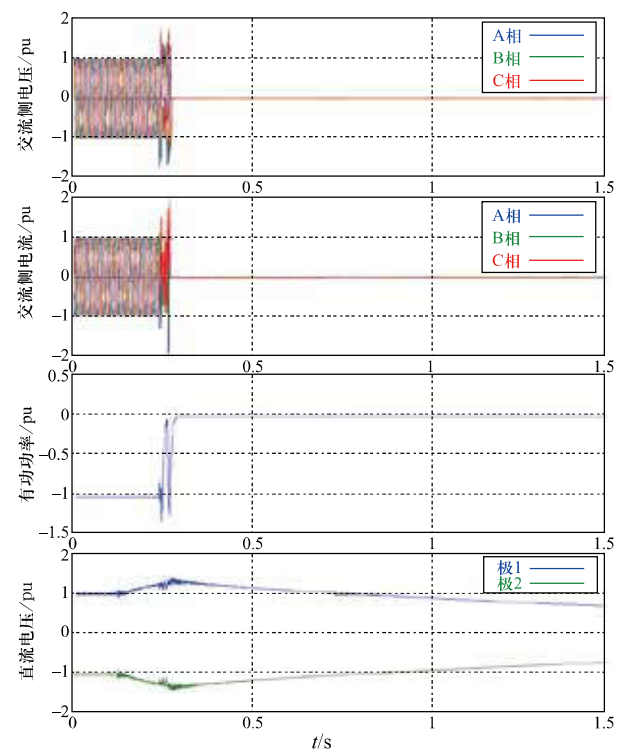


图7 风场侧波形(三相短路故障不投入DC Chopper)

Fig. 7 Wind farm side (three phase fault without DC Chopper)

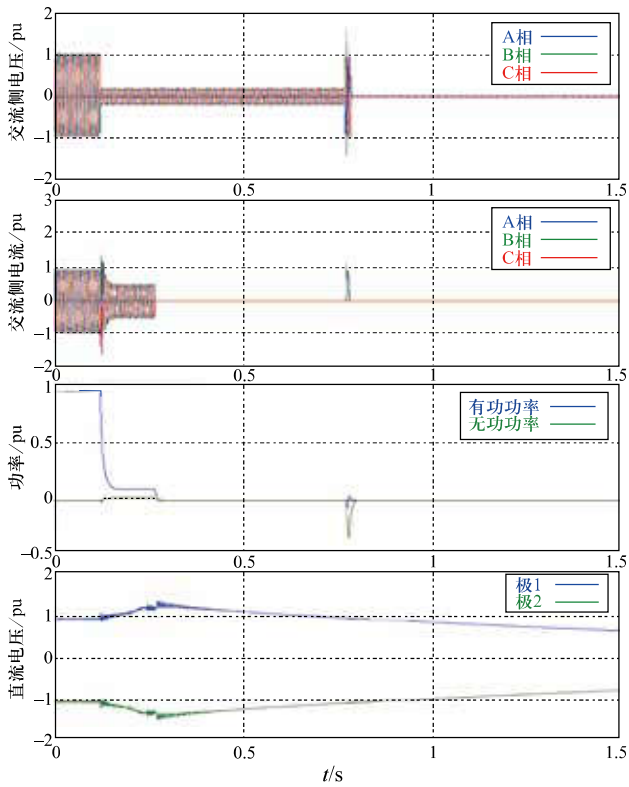


图8 电网侧波形（三相短路故障不投入DC Chopper）
Fig. 8 Main grid side (three phase fault without DC Chopper)

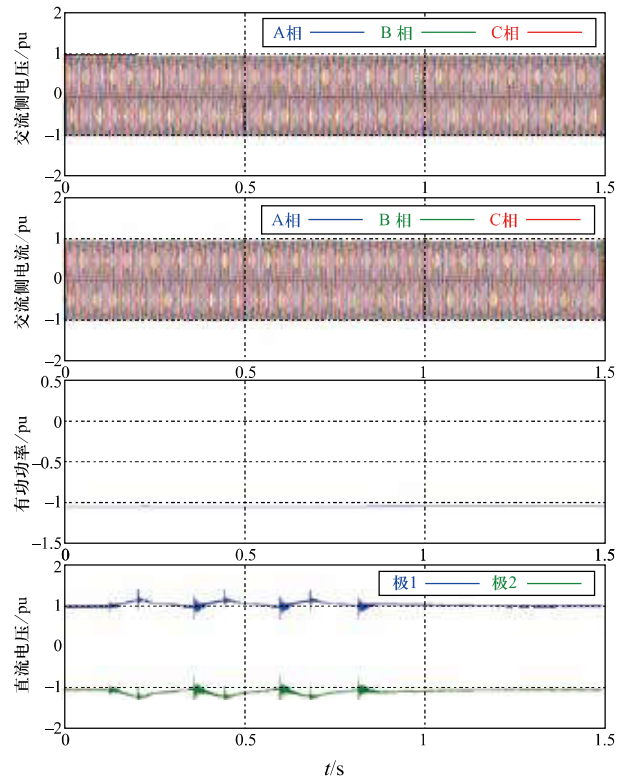


图9 风场侧波形（三相短路故障投入DC Chopper）
Fig. 9 Wind farm side (three phase fault with DC Chopper in operation)

从本算例仿真结果以及分析可以看出，需要采取措施来避免系统中的过电压。在下面的仿真算例中对同种故障工况下投入DC Chopper来抑制过电压的过程进行了仿真验证。

3.2 三相短路故障后投入DC Chopper

图9~图10为仿真结果波形。故障前，系统正常运行，风电场送出功率与直流输电系统的输送功率均为1 pu，当 $t=0.12$ s时电网侧靠近换流站处发生三相短路故障。两图分别显示了两侧换流器母线三相电压、换流器母线三相电流、换流器母线功率（送出为正）和直流电压。

如图9所示，整个过程中风场侧PCC点交流电压几乎无波动，电流也无明显变化，有功功率及无功功率与故障前无差异，充分体现了VSC-HVDC对于故障的可靠隔离。

如图10所示，电网侧三相故障后PCC点交流电压跌落，主电网侧PCC点电流在故障中有一定程度的增大但是在可控范围，有功功率输出随着电压的跌落几乎为零，无功功率经历了增大又减小的过程。故障消失后，无功功率的振荡是由于换流变压器的饱和引起

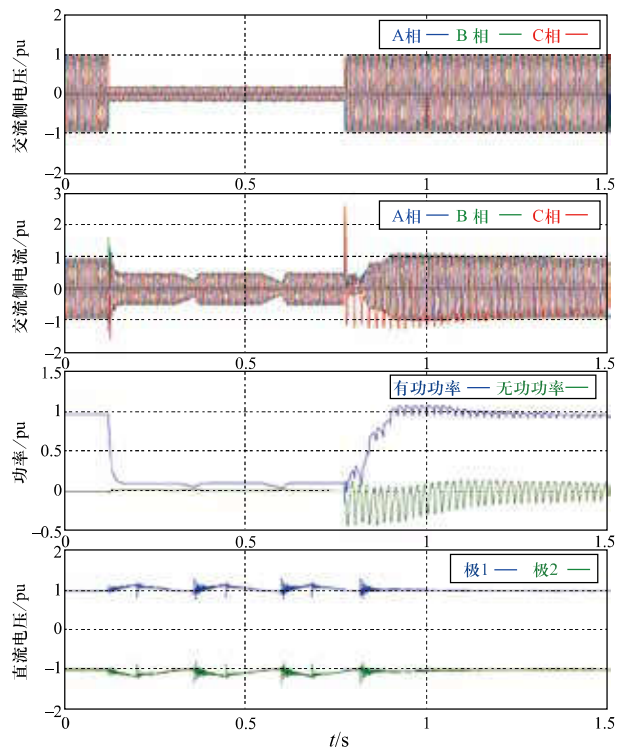


图10 电网侧波形（三相短路故障投入DC Chopper）
Fig. 10 Main grid side (three phase fault with DC Chopper in operation)

的, 此现象在文献[20]中做了相应的介绍。

根据第2章的分析, 当电网侧发生故障, 有功功率不能送出时, 系统中的盈余功率会导致电容不断充电而产生过电压, 所以直流电压是DC Chopper最直接的控制输入信号。当直流侧电压升至定值时, DC Chopper动作并将电阻接入系统以耗散盈余的能量。随着能量的耗散, 直流侧电压开始回落, 当电压回落到定值时DC Chopper将电阻切除。

从本算例仿真结果以及分析可以得出结论: 在电网侧交流系统故障工况下投入DC Chopper来抑制过电压, 即便对于最严重的三相短路故障也是有效的, 故障后系统能够恢复到故障前状态。这说明采用DC Chopper是解决此类问题的可靠方案。

另外需要特别指出的是, 从仿真波形上看, 电网侧发生最严重故障时, 风场侧换流器母线处的交流电气量几乎无变化。这对于风机本身而言无疑是最理想的情况, 充分验证了风电场通过VSC-HVDC接入电网时, 电网侧故障扰动将被VSC-HVDC及其辅助装置良好隔离, 风场侧交流电压独立于电网侧交流电压, 风机无需承受由电网侧故障而产生的电气和机械应力。这对于优化风机以及整个风场的设计带来了更多的可能性。

3.3 算例综合分析和评估

综合以上仿真算例可以看出, 故障过程中, 通过投入DC Chopper以维持系统运行, 故障消失后DC Chopper切除, 系统恢复正常运行。从风场侧看, PCC点的电压、电流等电气量无明显变化, 故障几乎完全被VSC-HVDC系统隔离, 使风机可能承受的应力大大降低。从电网侧看, PCC点的电压由于近端故障而跌落, 电网侧电流被限制在可控范围内, VSC可以向系统提供无功支持, 改善系统的故障恢复过程。

4 结论

基于电压源换流器的直流输电系统可以满足海上风电场接入的大容量、远距离要求, 具备良好的灵活性与可靠性, 同时能够将主电网与风电场“隔离”运行, 基本消除了主电网故障时风机承受的电气和机械应力。本文研究了采用VSC-HVDC接入时, 电网侧故障下风电场的故障穿越方案。对比了AC Chopper与DC Chopper方案的技术经济性。DC Chopper具有盈余功率与耗能精准匹配、系统波动小、恢复时间短、设

备投资和尺寸小、稳态损耗小等优点。通过仿真模拟了基于DC Chopper的海上风电通过VSC-HVDC接入电网的故障穿越过程。仿真结果表明, 当发生电网侧交流系统短路故障时, 投入DC Chopper能够耗散系统中的盈余能量, 抑制直流侧过电压。该方案可为海上风电接入电网提供技术支持。

参考文献

- [1] Global Wind Energy Council. GWEC global wind statistics 2017[R]. Brussels: GWEC, 2018.
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2017[R/OL]. (2018)[2019-01-31]. <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>.
- [3] WindEurope. Wind in power 2017: Annual combined onshore and offshore wind energy statistics[R/OL]. (2018-02)[2018-11-30]. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf>.
- [4] 袁兆祥, 仇卫东, 齐立忠. 大型海上风电场并网接入方案研究[J]. 电力建设, 2015, 36(4): 123-128.
Yuan Zhaoxiang, Qiu Weidong, Qi Lizhong. Grid connected solution for large offshore wind farm[J]. Electrical Power Construction, 2015, 36(4):123-128(in Chinese).
- [5] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3770.
Chi Yongning, Liang Wei, Zhang Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3700(in Chinese).
- [6] 陈鹤林, 徐政. 海上风电场柔性直流输电并网系统暂态特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 430-439.
Chen Helin, Xu Zheng. Transient characteristic study of offshore wind connection with VSC-HVDC[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2015, 36(2):430-439(in Chinese).
- [7] P. Sandeberg, L. Stenius. Large scale offshore wind power energy evacuation by HVDC Light[C]. EWEC, Brussels, Belgium, 2008.
- [8] A. Abdalrahman, E. Isabegovic, DolWin1 – Challenges of connecting offshore wind farms[C]. IEEE International Energy Conference, Leuven, Belgium, 2016.
- [9] T. Bublat and T. Gehlhaar. Comparison of high technical demands on grid connected wind turbines defined in international grid codes[C]. Workshop Large-Scale Integr. Wind Power into Power Syst., Madrid, Spain, 2008.
- [10] 国家电网公司. 国家电网公司企业标准: Q/GDW 11410—2015 海上风电场接入电网技术规定[S]. 北京, 2016.
State Grid Corporation of China. Enterprise standard of SGCC: Q/GDW 11410—2015 Technical rule for connecting offshore wind farm into power grid[S]. Beijing, 2016(in Chinese).

- [11] 李飞飞, 王亮, 齐立忠, 等. 海上风电典型送出方案技术经济比较研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(11): 140-144.
Li Feifei, Wang Liang, Qi Lizhong, et al. Technical and economical comparisons of typical transmission schemes of the offshore wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(11): 140-144(in Chinese).
- [12] 杨耕, 郑重. 双馈型风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电力电子技术, 2011, 45(8): 32-36.
Yang Geng, Zheng Zhong. Review of low voltage ride-through technology for doubly-fed induction generator based wind energy conversion systems[J]. Power Electronics, 2011, 45(8): 32-36(in Chinese).
- [13] 曹鹏飞, 邹博, 吴林林, 等. 综合Crowbar和Chopper保护的双馈风机低电压穿越仿真研究[J]. 华北电力技术, 2017(2): 49-54.
Cao Pengfei, Zou Bo, Wu Linlin, et al. Research of low voltage ride-through techniques for DFIG based on Crowbar and Chopper[J]. North China Electric Power, 2017(2): 49-54(in Chinese).
- [14] 蔚兰, 陈宇晨, 陈国呈, 等. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略的理论分析与实验研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 30-36.
Yu Lan, Chen Yuchen, Chen Guocheng, et al. A low voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 30-36(in Chinese).
- [15] 陈浩, 胡晓波, 严干贵, 等. 直驱永磁风力发电机组低电压穿越的协调控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1464-1470.
Chen Hao, Hu Xiaobo, Yan Gangui, et al. A coordinated control strategy for low voltage ride-through of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1464-1470(in Chinese).
- [16] 张坤, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 7-14.
Zhang Kun, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7):7-14(in Chinese).
- [17] B. Jacobson, P. Karlsson, et al. VSC-HVDC with cascaded two-level converters[C]. B4-110, CIGRE 2010.
- [18] 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(in Chinese).
- [19] Y. Jiang-Hafner, R. Ottersten, HVDC with voltage source converters – a desirable solution for connecting renewable energies[C]. Conference on Large-scale Integration of Wind Power Into Power System, Bremen, Germany, 2009.
- [20] CIGRE Working Group C4. Transformer energization in power system: A study guide[R]. 2014.

收稿日期: 2018-12-29; 修回日期: 2019-02-15。



王国英

作者简介:

王国英(1985), 男, 高级工程师, 现供职于ABB(中国)有限公司HVDC研发部, 研究领域为HVDC系统设计、换流阀、控制保护等, E-mail: forrest-guoying.wang@cn.abb.com。

贾一凡(1986), 男, 高级工程师, 研究领域为HVDC系统设计、换流阀、电力电子设备等。

邓娜(1988), 女, 工程师, 研究领域为HVDC系统设计、换流阀、电力电子设备等。

Arman Hassanpoor, 男, 博士, 长期从事高压直流输电以及电力电子的仿真研究。

(责任编辑 李锡)