

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181468

## 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究

傅春翔<sup>1</sup>, 汪天呈<sup>1</sup>, 郇洪柯<sup>1</sup>, 徐雨哲<sup>2</sup>, 徐政<sup>2</sup>, 杨林超<sup>2</sup>, 张哲任<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 柔性直流输电技术凭借其可为无源电网提供同步交流电源支撑的能力, 正逐渐成为远距离海上风电并网的首选方案。主要针对柔性直流系统用于海上风电并网时的接地方式进行了深入的研究。首先对比分析了目前已有工程中的几种换流站接地方式, 描述了几种接地方式的优缺点。然后介绍了柔性直流系统用于海上风电并网的拓扑结构和控制策略, 选出了三种适用于该场景的换流站接地方式。最后针对国内某规划海上风电场, 在电磁仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建了±320 kV/1 100 MW 柔性直流系统仿真模型。并基于该模型对柔性直流系统进行了故障扫描, 研究对比了三种接地方式下系统的过电压特性, 得出三种接地方式下的柔性直流系统均具有相似的过电压特性。该研究成果填补了相关研究领域的空白, 可以为国内的海上风电并网工程提供参考依据。

**关键词:** 柔性直流输电系统; 海上风电场; 接地方式; 模块化多电平换流器; 过电压

### Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration

FU Chunxiang<sup>1</sup>, WANG Tiancheng<sup>1</sup>, LI Hongke<sup>1</sup>, XU Yuzhe<sup>2</sup>, XU Zheng<sup>2</sup>, YANG Linchao<sup>2</sup>, ZHANG Zheren<sup>2</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China;

2. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on its ability to provide synchronous AC power support for passive grids, Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current (VSC-HVDC) is gradually becoming the preferred solution for long-distance offshore wind farm integration. It focuses on the grounding method of VSC-HVDC used for offshore wind farm integration. Firstly, several grounding methods of converter stations in the existing engineering are compared and analyzed, and the advantages and disadvantages are described. Then the structure and control strategy of VSC-HVDC for offshore wind farm integration are introduced. And three grounding methods for converter stations suitable for this situation are proposed. Finally, for a domestic planned offshore wind farm, a simulation model of ±320 kV/1 100 MW MMC system is built in the electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC. The fault scanning of MMC system is carried out based on the simulation model and the overvoltage characteristics of the system under three grounding methods are compared and the results show that VSC-HVDC in the three grounding methods have similar overvoltage characteristics. The research results of this paper fill the gaps in related research fields and provide reference for domestic offshore wind farm integration projects in future.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA051704).

**Key words:** VSC-HVDC; off-shore wind farm; grounding methods; modular multilevel converter; overvoltage

## 0 引言

近年来, 为减少化石资源的消耗和防治生态环境污染, 我国大力支持发展新能源发电产业, 如光伏发电、风力发电等。目前风力发电在我国电力总

装机中的比重已超过 7%, 成为仅次于火电、水电的第三大电力来源。其中海上风力资源优质、丰富, 且远离居民生活作业区, 对环境的影响较小, 因而更是受到众多开发者的关注<sup>[1-2]</sup>。到 2017 年 4 月, 中国海上风电核准项目容量 817 万 kW, 并网容量 148 万 kW, 位列全球第三位, 仅次于英国和德国。随着海上风电政策的明确, 建设成本的持续优化以及

基金项目: 国家 863 计划基金项目资助 (2012AA051704)

配套产业的日渐成熟,我国海上风电在“十三五”期间迎来了加速发展期。

海上风电的并网方式主要可分为交流并网和直流并网两种类型,当离岸距离超过 90 km 且风电场容量大于 100 MW 时,风电场采用高压直流并网更为合适<sup>[3-6]</sup>。其中,基于电压源换流器的柔性直流输电(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)技术,具有控制灵活,不需要电网提供换相电压,可以为风电机组提供同步交流电源支撑等优势,是一种极为适合海上风电并网的输电技术。采用柔直技术能够节省海上平台空间,减弱风电波动性,目前已经投运的远距离大容量风电场均采用柔性直流输电技术作为并网方案<sup>[7-10]</sup>。

现有国外海上风电采用柔性直流送出的工程中,均采用对称单极结构的两端直流输电系统,这种结构的柔直系统在直流侧没有中性极线,因此需要另外的接地结构为柔直系统提供零电位参考点。然而,目前对于风电经柔性直流系统并网的研究主要集中在拓扑研究、控制器的设计与优化和故障穿越等方面<sup>[11-22]</sup>。已有文献对换流站接地方式的研究相对较少,且主要集中于陆上柔直系统接地方式的研究<sup>[23]</sup>。文献[23]分析了换流站采用不同接地方式下,网侧零序电气量向阀侧和直流侧传播的机理;文献[24]分析了柔性直流配电网中采用直流电容中点接地方式对故障特性的影响。

但上述文献均未涉及对海上风电柔直送出系统的接地方式研究。海上风电送出工程中,通常存在换流站可用占地面积较小,海上换流站接地困难等限制因素,因此需要针对其接地方式展开研究。本文主要研究了对称单极柔性直流系统目前已有的几种可行的接地结构,并选取了三种适用于海上风电送出场合的接地方式,以国内某规划海上风电场为研究对象,仿真对比了不同接地方式对海上风电直流送出系统运行特性的影响。

本文主要由以下几部分构成:第 1 节详细介绍了现有几种 MMC 换流站接地方式的特点;第 2 节主要介绍了用于海上风电送出的柔直系统的拓扑结构和控制策略;第 3 节基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC,搭建了国内某规划风电场的仿真模型,并利用该仿真模型对柔直系统进行了故障扫描,对比研究了不同接地方式下柔直系统的过电压特性;第 4 节对本文所研究的内容进行了总结。

## 1 MMC 换流站接地方式分类

目前已有的国外海上风电工程中,采用 MMC

送出的项目多数都采用对称单极结构的两端直流输电系统。针对对称单极结构的 MMC 直流输电系统,目前工程上常用的接地方式主要分为直流侧接地和交流侧接地两种。其中直流侧接地方式主要包括直流侧经电容接地,直流侧经钳位电阻侧接地;交流侧接地方式主要包括变压器阀侧星型电抗器中性点经大电阻接地、变压器阀侧中性点经大电阻接地、变压器阀侧中性点经大电抗接地等。以下对上述几种接地方式进行详细介绍。

### 1.1 直流侧经电容接地

如图 1(a)所示,该方式借鉴了传统两电平电压源换流器的接地方式,换流站出口处的正负极直流线路通过电容引出接地支路,在提供零电位参考点的同时,能够起到稳定和支撑直流电压的作用。但该接地方式应用于高压直流输电工程时,对电容器要求较高,导致设计制造困难。同时当正负极所连电容容值偏差较大时,会导致整个直流系统正负极不对称运行。

### 1.2 直流侧经钳位电阻接地

如图 1(b)所示,由于 MMC 子模块中自带的电容本身便起到了支撑直流电压的作用,因此无需在直流侧进一步安装支撑电容。为了节省投资成本,可以将直流侧经电容接地方式的电容器用钳位大电阻代替,以引出接地支路。该方式比经电容接地的方式经济性更好,但需要选取合适的钳位电阻,当电阻过小时,会导致稳态运行时损耗过大,降低经济效益;而当电阻过大时,系统近似不接地,无法实现提供零电位参考点的功能。此外,该接地方式同样存在正负极钳位电阻偏差较大时正负极不对称运行的问题。

### 1.3 变压器阀侧星型电抗器中性点经大电阻接地

如图 1(c)所示,该接地方式在变压器阀侧并联一个星型电抗器,并从电抗器中点经大电阻接地。该方法对联接变压器的联接方式没有限制,且能够在直流侧发生故障时限制故障电流,降低对联接变压器过电流耐受能力的要求。但是,星型电抗器的取值是一个需要解决的问题,电抗值过小会在稳态运行过程中消耗大量无功,电抗值过大则会导致占地面积增大,增加建造成本。该接地方式会在一定程度上影响换流站的正常运行范围。

### 1.4 变压器阀侧绕组中性点经大电阻接地

如图 1(d)所示,采用该接地方式时,联接变压器必须采用 $\Delta/Y_0$ 或 $Y/Y_0$ 的联接方式,阀侧绕组中性点通过一个大电阻接地,为阀侧提供零电位参考

点。该方式具有设备成本低、占地面积小等优点。该方式的缺点为：需要依靠变压器阀侧的星型绕组承受故障下的直流电压和暂态电流，当用于高压大容量场景时，变压器本体的设计难度较大。

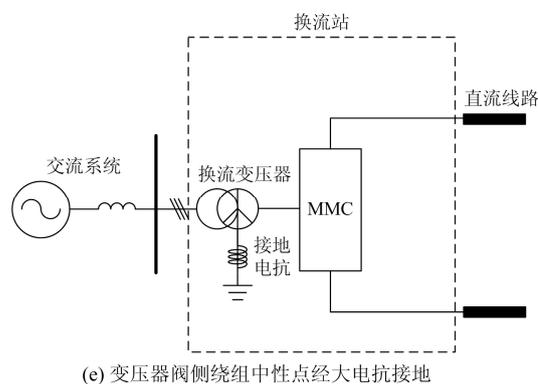
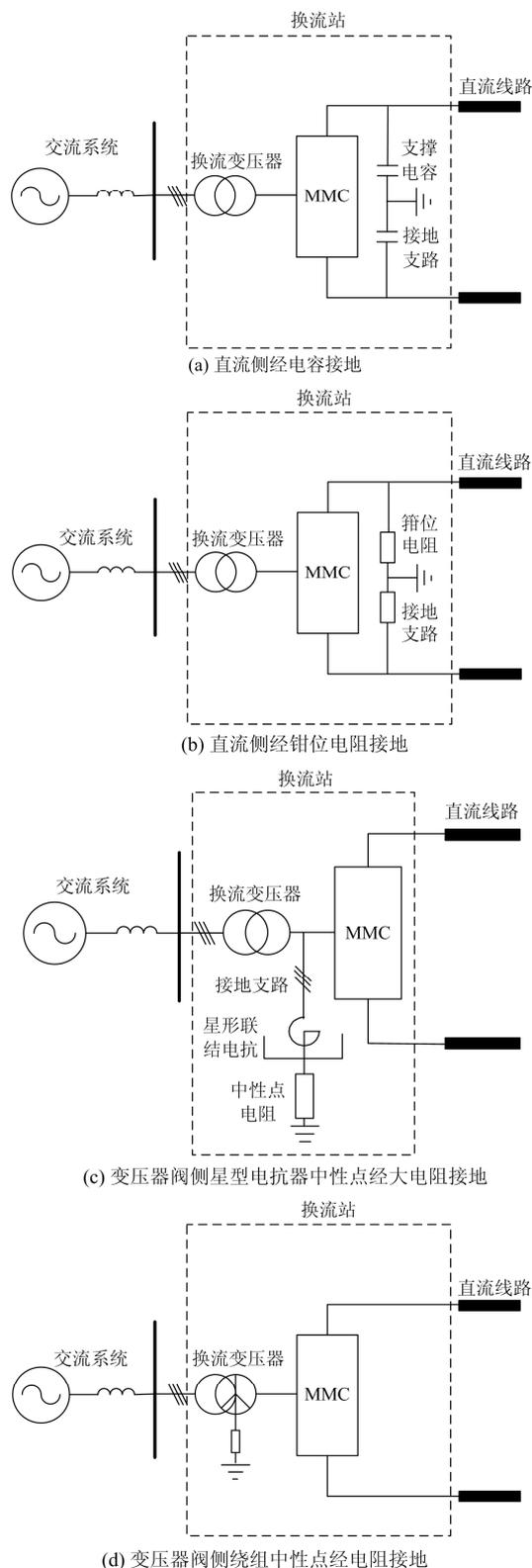


图 1 MMC 换流站接地方式

Fig. 1 Grounding methods of MMC

### 1.5 变压器阀侧绕组中性点经大电抗接地

除了上述四种接地方式外，西门子公司提出了一种变压器阀侧中性点经大电抗接地的方式，并将其应用在欧洲海上风电送出工程 Helwin2 和 Bolwin3 中。该接地方式要求联接变压器必须采用  $\Delta/Y_0$  或  $Y/Y_0$  的联接方式，阀侧绕组中性点经一个大电抗接地，提供零电位参考点。使用该方式的主要难点在于接地电抗的电感值较大，从而导致占地面积较大且设计制造难度较高。

### 1.6 国内高压柔性直流输电工程的接地方式

上述接地方式中，直流侧接地方式由于存在正负极不对称运行的风险，在国内已有的柔性直流输电工程中没有得到应用。而变压器阀侧中性点经大电抗接地的方式，由于高压电抗器所需占地面积和制作水平较高，也未被应用于国内柔直工程。

目前国内典型的柔性直流工程中，采用对称单极接线的有南汇柔直工程、舟山五端柔直工程、渝鄂柔直工程。其中南汇工程和渝鄂工程均采用变压器阀侧中性点经大电阻接地方式，舟山工程中各个换流站采用的接地方式不同，定海站和岱山站采用变压器阀侧星型电抗器中性点经大电阻接地，衢山站和泗礁站的零电位参考点由其他换流站提供，洋山岛站采用变压器阀侧中性点经大电阻接地方式。

## 2 用于海上风电送出的柔性直流输电系统

### 2.1 拓扑结构

用于海上风电送出的柔直系统拓扑结构如图 2 所示，陆上换流站经联接变压器与陆上交流系统相连，向交流系统送出功率，海上换流站经联接变压器与海上风电场相连，从风场吸收功率。两端换流站的联接变压器均采用双变压器并联的拓扑结构，从而保证其中一台变压故障时，换流站通过另

一台变压器仍然能够输送 75% 的功率。其中联接变压器的联接方式与换流站接地方式有关。

陆上换流站和海上换流站均为 MMC 换流站，其拓扑结构如图 3 所示，采用三相六桥臂结构，每个相单元由上下两个桥臂组成，每个桥臂由  $N$  个子模块和一个电感值为  $L_0$  的桥臂电抗器串联构成，子模块采用半桥子模块，由两个 IGBT 管和反向并联二极管以及一个子模块电容  $C_0$  构成。其中  $u_{vj}$  ( $j = a, b, c$ ) 表示联接变压器阀侧的  $j$  相相电压， $U_{dc}$  为直流侧正负极母线间电压。

与典型的 MMC 换流站拓扑不同的是，该拓扑中没有在直流侧安装平波电抗器，而是将桥臂电抗器安装于靠近直流母线的位置，起到代替平波电抗器的作用。使用该拓扑是为了节省两侧换流站(尤其是海上换流站)的建造空间，从而降低换流站的建造难度和成本。

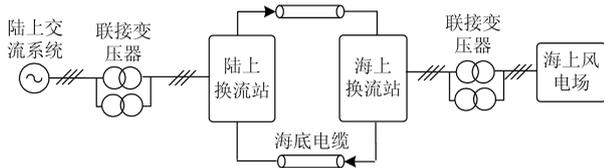


图 2 用于海上风电送出的柔性直流系统拓扑

Fig. 2 Structure of VSC-HVDC for offshore wind farm integration

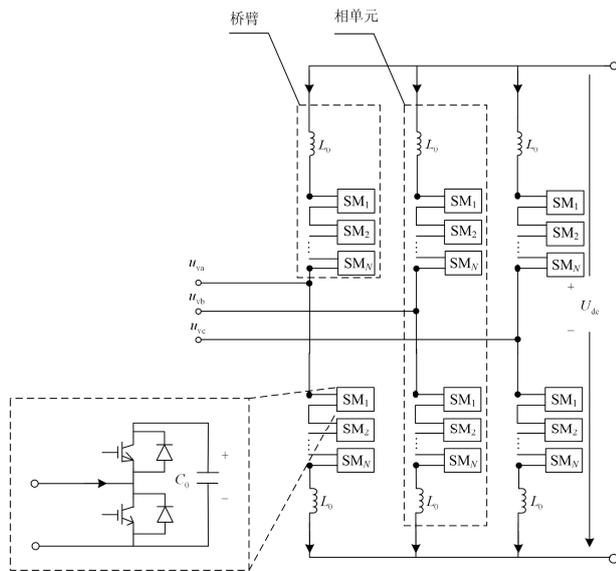


图 3 MMC 换流器拓扑结构

Fig. 3 Topology of MMC

### 2.2 控制策略

对于并网型风电机组，不管是全功率换流器型风电机组还是双馈型风电机组，均需要由所连接的交流系统提供稳定的同步交流电压才能正常运行。

而对于海上风电场来说，其所连接的交流网络本身即为无源网络，而电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)也需要稳定的同步交流电源才能运行，这便决定了海上风电采用直流输电方式送出时，必须使用柔性直流输电系统。

图 2 所示的拓扑中，海上换流站的主要功能是控制风场侧交流系统的电压频率和幅值，从而为海上风电场提供稳定的同步交流电源。海上换流站的控制策略与向无源系统送电的受端 MMC 控制策略相同，为定换流站交流母线的电压幅值和频率。由于海上换流站的两个控制自由度已经用尽，直流系统电压必须由陆上换流站来控制，因此陆上换流站采用定直流电压和定交流侧无功功率的控制模式。此时，两侧换流站已没有多余的控制自由度来控制柔直系统输送的有功功率，柔直系统输送的有功功率即为风场侧所发的有功功率。

### 2.3 接地方式的选择

对于用于海上风电送出的柔性直流输电系统，要分别设计海上换流站和陆上换流站的接地方式。其中海上换流站由于位于海上平台，为了尽量降低换流站体积和占地面积，减少设备数量，通常不设置专门的接地支路，而由陆上换流站来提供零电位参考点，其联接变压器可以采用  $Y_0/Y$  或  $Y_0/\Delta$  的联接方式。

陆上换流站的接地方式主要从第 1 节中介绍的几种接地方式中进行选择，其中直流侧接地方式由于存在正负极不对称运行的风险，不再纳入讨论范围。本文将针对表 1 中的三种接地方式进行仿真对比，研究陆上换流站采用三种接地方式的优缺点，从而研究用于海上风电送出的柔直系统接地方式。

表 1 陆上换流站接地方式

Table 1 Grounding methods of onshore converter station		
序号	接地方式	变压器联接方式
1	变压器阀侧星型电抗器中性点经大电阻接地	$Y_0/\Delta$
2	变压器阀侧绕组中性点经大电阻接地	$Y_0/Y$
3	变压器阀侧绕组中性点经大电抗接地	$Y_0/Y$

## 3 仿真研究

### 3.1 海上风电场参数

本文针对国内某规划海上风电场，仿真对比不同接地方式对海上风电直流送出系统运行特性的影响。该海上风电场的总装机容量为 1 100 MW，分为三个子风电场，并通过海上升压站汇集后由柔性直流输电系统送出，其规划图如图 4 所示，风电场参数如表 2 所示。

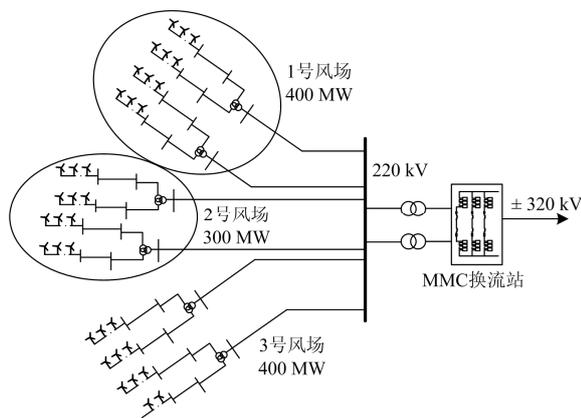


图 4 海上风电场规划示意图

Fig. 4 Schematic diagram of offshore wind farm

表 2 海上风电场参数

Table 2 System parameters of offshore wind farm

类别	参数	
	类型	鼠笼异步型
风力发电机	额定容量	4 MW
	额定电压	0.69 kV
	网侧变压器变比	0.69/36.75 kV
升压变压器	类型	双分裂变压器
	额定电压	230/36.75 kV
	额定容量	180/90/90 MVA
	穿越阻抗	21%

### 3.2 仿真模型参数

根据图 4 和表 2, 在 PSCAD 中搭建海上风电场的电磁暂态仿真模型。所搭建的 PSCAD 模型中, 用于风电送出的柔性直流输电系统参数如表 3 所示。

表 3 柔性直流系统主回路参数

Table 3 Main circuit parameters of MMC-HVDC

参数	陆上换流站	海上换流站	
直流电压/kV	± 320	± 320	
额定容量/MVA	1 100	1 100	
换流站	子模块电压/kV	2	2
	桥臂子模块数量	320	320
	子模块电容/ $\mu\text{F}$	8 500	8 500
	桥臂电感/mH	90	90
联接变压器	额定容量/MVA	$825 \times 2$	$825 \times 2$
	漏抗/p.u.	0.16	0.16
	额定变比/kV	230/336	230/336
联接方式	随接地方式变化	$Y_0/Y$	
交流侧	交流母线电压/kV	230	230
	交流系统短路比	7	—
直流电缆	导体截面积	$2\ 000\ \text{mm}^2$	—
	长度	105 km	—

为了方便表述三种方式的对比研究过程, 将表 1 中的三种接地方式分别简称为方式一、方式二和方式三, 三种接地方式的参数设置如表 4 所示。

表 4 接地方式参数

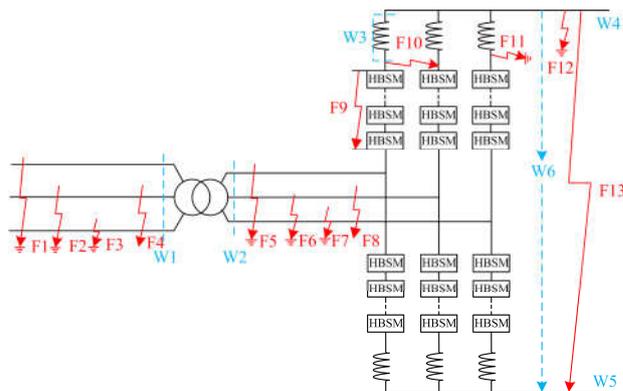
Table 4 Parameters of grounding methods

接地方式	变压器联接方式	星型电抗器	接地参数
方式一	$Y_0/\Delta$	5 kH	5 k $\Omega$
方式二	$Y_0/Y$	—	5 k $\Omega$
方式三	$Y_0/Y$	—	5 kH

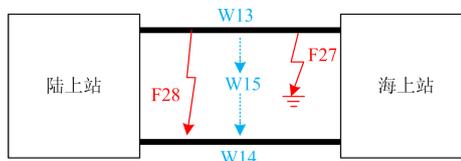
### 3.3 故障设置

为了研究不同接地方式对换流站故障响应特性的影响, 需要根据柔性直流输电系统的实际情况, 对可能发生的典型故障进行扫描, 计算不同接地方式下的过电压。

本文所考虑的故障主要可分为换流站故障和直流线路故障, 两种故障的具体分布如图 5 所示。其中换流站故障又可分为交流侧故障和直流侧故障, 如图 5(a)中所示, F1—F8 代表交流侧故障, 分别为联接变压器网侧三相接地故障、两相接地故障、单相接地故障、相间短路故障以及换流变阀侧三相接地故障、两相接地故障、单相接地故障、相间短路故障; F9—F13 代表直流侧故障, 分别为桥臂短路故障、桥臂间短路故障、阀顶对地故障、换流站直流出口单极接地故障和换流站直流出口双极短路故障。



(a) 换流站故障点和电压观测点



(b) 直流线路故障点和电压观测点

图 5 柔性直流系统典型故障及电压观测点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fault locations and voltage observing points in the MMC-HVDC system

下文中为表述方便, 将上述故障按陆上换流站和海上换流站分别标记, 其中陆上换流站故障记为 F1—F13, 海上换流站故障记为 F14—F26(故障顺序与陆上换流站相同)。直流线路故障主要考虑线路中点单极接地故障和双极短路故障, 如图 5(b)中 F27 和 F28 所示。

上述故障中, 陆上换流站的联接变压器网侧故障(F1—F4)一般发生在架空线上, 可以认为是瞬时性故障。而直流线路以及海上换流站交流侧线路一般均采用电缆, 因此认为剩下的故障(F5—F28)均为永久性故障。

仿真过程中, 对于瞬时性故障, 设置故障持续时间为 100 ms; 对于永久性故障, 当检测到换流器桥臂电流超过 IGBT 额定电压 2 倍(即 4 kA)时, 闭锁换流器, 同时在故障后 100 ms 跳开陆上换流站和海上换流站的交流侧断路器。

为了分析接地方式对柔直系统不同位置过电压的影响, 仿真时重点观测图 5 几个位置的过电压, 分别为: 陆上换流站的网侧交流电压(W1)、阀侧交流电压(W2)、桥臂电抗器两端电压(W3)、正极直流出口电压(W4)、负极直流出口电压(W5)和极间电压(W6); 海上换流站的网侧交流电压(W7)、阀侧交流电压(W8)、桥臂电抗器两端电压(W9)、正极直流出口电压(W10)、负极直流出口电压(W11)和极间电压(W12); 直流线路中点处正极电压(W13)、负极电压(W14)和极间电压(W15)。

### 3.4 仿真结果分析

按照 3.3 节中设置的故障类型和电压观测点, 在 PSCAD 中对三种接地方式进行故障扫描, 得到不同接地方式下各个电压观测点的最大过电压以及其对应的故障类型如表 5 所示。

分析表 5 可知, 采用不同接地方式的柔直系统其最高过电压所对应的故障类型也有所不同。采用接地方式一的柔直系统, 其整流站出口、逆变站出口以及线路中点处的极间最高过电压均要高于另外两种接地方式, 且最高过电压均由逆变站换流变阀侧两相接地故障造成(F20)。采用接地方式二的柔直系统, 其各个电压观测点最严重的过电压多数由整流站变压器网侧三相接地故障(F1)引起。采用接地方式三的柔直系统中, 多数最高过电压由整流站出口正极接地故障(F12)引起。

对比三种接地方式的过电压水平, 可以看到大多数电压观测点的最大过电压基本相同, 差别主要体现在 W3、W6、W9、W12、W15 这几处的过电压水平。其中 W6、W12 和 W15 均为极间电压, 采用接地方式一时过电压水平最高; W3 为整流站桥

臂电抗两端电压, W9 为逆变站桥臂电抗两端电压, 两者的最大过电压均为采用接地方式三时最高。此外, W4、W10 和 W13 三处的正极电压在接地方式二下的过电压水平要低于另外两种接地方式。

表 5 三种接地方式的系统过电压特性

Table 5 System overvoltage characteristics of three grounding methods

电压观测点	grounding methods					
	方式一		方式二		方式三	
	最大过电压/kV	对应故障类型	最大过电压/kV	对应故障类型	最大过电压/kV	对应故障类型
W1	217	F10	219	F10	208	F14
W2	713	F25	707	F25	712	F25
W3	582	F5	508	F10	588	F6
W4	597	F7	415	F1	590	F7
W5	785	F12	757	F1	793	F12
W6	961	F20	867	F1	858	F25
W7	502	F6	477	F10	502	F6
W8	722	F12	730	F12	745	F22
W9	510	F28	524	F19	721	F18
W10	613	F7	440	F1	602	F7
W11	774	F12	788	F1	783	F12
W12	921	F20	912	F12	896	F12
W13	609	F7	411	F4	595	F7
W14	797	F12	785	F1	806	F12
W15	990	F20	902	F1	911	F12

## 4 结论

本文对适用于对称单极柔性直流输电系统的换流站接地方式进行了分类总结, 并从中选取了三种较为适合用于海上风电送出柔直系统的接地方式, 分别为变压器阀侧星型电抗器中性点经大电阻接地, 变压器阀侧绕组中性点经大电阻接地和变压器阀侧绕组中性点经大电抗接地。

以国内某规划海上风电场为研究对象, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型, 对比研究了三种接地方式下柔直系统的过电压特性。分析仿真结果可以得出, 在过电压特性方面, 除个别电压观测点之外, 三种接地方式下系统各处的最大过电压基本相同, 均可作为海上风电柔直系统的接地方式。关于接地方式的后续研究, 可以将占地面积和投资成本纳入考虑因素, 对三种接地方式进行进一步的对比和选择。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 风电发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2016.
- [2] 郑海, 杜伟安, 李阳春, 等. 国内外海上风电发展现状[J]. 水电与新能源, 2018, 32(6): 75-77.

- ZHENG Hai, DU Wei'an, LI Yangchun, et al. Current situation of the offshore wind power development all over the world[J]. *Hydropower and New Energy*, 2018, 32(6): 75-77.
- [3] 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. Study on transient behavior of DC flexible on-grid transmission system in offshore wind farm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(2): 430-439.
- [4] GLASDAM J. Review on multi-level voltage source converter based HVDC technologies for grid connection of large offshore wind farms[C] // 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), October 30 - November 2, 2012, Auckland, New Zealand.
- [5] BOUBZIZI S, ABID H, ELHAJJAJI A, et al. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 214-225. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
- [6] 段贵钟, 秦文萍, 逯瑞鹏, 等. 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 108-114.
- DUAN Guizhong, QIN Wenping, LU Ruipeng, et al. Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(12): 108-114.
- [7] HUSSENNETHER V, RITTIGER J, BARTH A, et al. Projects BorWin2 and HelWin1—large scale multilevel voltage-sourced converter technology for bundling of offshore windpower[C] // Proc CIGRE Session, 2012, 4: 306.
- [8] 张彦兵, 谢文龙, 王伟, 等. 永磁直驱风机直流并网的启停控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 143-148.
- ZHANG Yanbing, XIE Wenlong, WANG Wei, et al. Start/stop control of permanent magnet direct drive wind turbine on DC grid connection[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 143-148.
- [9] JACOBSON B. VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters[C] // Cigre Conference, Paris, France, 2010.
- [10] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [11] 朱晓东, 周克亮, 程明, 等. 大规模近海风电场 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制[J]. *电网技术*, 2009, 33(18): 17-24.
- ZHU Xiaodong, ZHOU Keliang, CHENG Ming, et al. Topologies and control of VSC-HVDC systems for grid-connection of large-scale offshore wind farms[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(18): 17-24.
- [12] 韩平平, 陈凌琦, 胡迪, 等. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 99-105.
- HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 99-105.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 葛廷利, 宁博扬, 陈金辉. 受端多端的混合直流系统输送风电的控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 191-195.
- GE Tingli, NING Boyang, CHEN Jinhui. Research on control strategy of received multiterminal DC system transporting mixed by the wind[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 191-195.
- [16] 赵成勇, 胡冬良, 李广凯, 等. 多端 VSC-HVDC 用于风电场联网时的控制策略[J]. *电网技术*, 2009, 33(17): 135-140.
- ZHAO Chengyong, HU Dongliang, LI Guangkai, et al. Control strategy for interconnection of wind farms by multi-terminal VSC-HVDC[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(17): 135-140.
- [17] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(2):

48-52.  
 GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.

[18] 管敏渊, 张静, 刘强, 等. 柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 31(15): 103-109.  
 GUAN Minyuan, ZHANG Jing, LIU Qiang, et al. The general control strategy of the flexible HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 31(15): 103-109.

[19] 于永生, 冯延晖, 江红鑫, 等. 考虑风能随机性的 VSC-HVDC 风电并网优化方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(1): 75-84.  
 YU Yongsheng, FENG Yanhui, JIANG Hongxin, et al. Optimization of wind farm grid integration via VSC-HVDC considering randomness of wind energy[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(1): 75-84.

[20] 欧阳荃一, 张旭航, 李东东. 基于 RTDS 的海上风电柔性直流输电控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 86-93.  
 OUYANG Hongyi, ZHANG Xuhang, LI Dongdong. Research on the control of flexible HVDC connected to offshore wind farms based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 86-93.

[21] 沈同, 王通通, 宋汉梁. 大规模风电经柔直并网时的系统稳态控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 109-114.  
 SHEN Tong, WANG Tongtong, SONG Hanliang. Control strategy for large-scale wind power generation connected with grids by VSC-DC[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12): 109-114.

[22] 欧阳荃一, 张旭航, 李东东, 等. 基于 RTDS 的海上风电柔性直流输电控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(8): 86-93.  
 OUYANG Hongyi, ZHANG Xuhang, LI Dongdong, et al. Research on the control of flexible HVDC connected to offshore wind farms based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(8): 86-93.

[23] 梅念, 陈东, 吴方劼, 等. 基于 MMC 的柔性直流系统接地方式研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1247-1253.  
 MEI Nian, CHEN Dong, WU Fangjie, et al. Study on grounding methods for MMC-based VSC-HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1247-1253.

[24] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网接地方式对故障特性的影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2353-2362.  
 DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Effects of grounding mode on fault characteristics in flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2353-2362.

收稿日期: 2018-11-22; 修回日期: 2019-01-03

作者简介:

傅春翔(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海上风电场柔性直流输电技术; E-mail: fu\_cx@ecidi.com

汪天呈(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输电与新能源发电技术; E-mail: wang\_tc@ecidi.com

郇洪柯(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输电与海上风电送出、直流海底电缆。E-mail: li\_hk@ecidi.com

(编辑 许威)