

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.023

电压源换流器直流侧短路故障特性分析*

胡竞竞¹, 高一波¹, 严玉婷², 徐习东^{1*}

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518020)

摘要: 电压源换流器直流侧发生故障时,其故障电压电流变化迅速,对系统造成了严重威胁。针对这一问题,从电力电子层面深入分析了电压源换流器直流侧短路故障中最为严重的两极短路故障过程。将故障过程分为3个阶段,推导了电容放电阶段直流电压、电流表达式,分析了不控整流初始阶段存在的两种情况,对不控整流稳态阶段提出了采用开关函数计算短路电流的方法。最后通过PSCAD/EMTDC环境下 ± 10 kV直流线路两极短路故障模型的仿真计算,对理论分析进行了验证。研究表明,两极短路故障后电路的响应情况与短路阻抗大小相关,短路阻抗较小时需要直流断路器在极短的时间内切除故障,短路阻抗较大时则可以利用交流侧的保护装置对直流侧电压、电流进行动态监测,实现直流侧短路故障的后备保护。

关键词: 电压源换流器; 两极短路故障; PSCAD/EMTDC

中图分类号: TM7 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0512-06

DC side short-circuit fault analysis of VSC

HU Jing-jing¹, GAO Yi-bo¹, YAN Yu-ting², XU Xi-dong¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518020, China)

Abstract: As the fault voltage and current change rapidly in case of DC side fault of voltage source converter(VSC), it's a serious threat to the whole system. Aiming at this problem, the mechanism of DC side short-circuit fault, which is the most serious DC side fault of VSC, was analyzed on power electronics level. The three stages of fault process were presented in detail. Firstly, fault voltage and current expressions of capacitor discharge stage were derived. Then, the existing two cases of the uncontrolled diode rectifier initial stage were elaborated further. Moreover, the calculation of short-circuit current of the uncontrolled diode rectifier stable stage using switch function was proposed as well. Finally, theoretical analysis of the short-circuit fault process was validated through the PSCAD/EMTDC simulation of ± 10 kV DC line. The results indicate that the response of the fault is related to the fault impedance closely. Quick removal of the fault needs to be done by DC circuit breaker instantly when the fault impedance is small, while backup protection could be obtained by dynamic monitoring voltages and currents in ac side using protection devices of ac side when the fault impedance is relatively large.

Key words: voltage source converter(VSC); short-circuit fault; PSCAD/EMTDC

0 引 言

随着现代社会数字化和网络化的发展,用户对供电容量、电能质量的要求不断提高,传统交流电网已难以满足电力供应要求^[1]。近年来,直流供电技术重新进入人们视野。与交流供电相比,直流供电具有线路损

耗小、输送容量大及供电质量高等优点^[2-5]。目前,直流供电技术在电信设施、舰船系统、铁路电气化牵引等领域应用比较成熟,同时,柔性直流输电、海上风电场、直流配电网等成为直流供电技术研究的新热点^[6-9]。

电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)以其优越的性能广泛应用于直流输配电领域,但由于滤

收稿日期: 2013-12-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2013AA050104)

作者简介: 胡竞竞(1988-),女,河北邯郸人,主要从事电力系统继电保护方面的研究. E-mail: huhu-miao@zju.edu.cn

通信联系人: 徐习东,男,副教授,硕士生导师. E-mail: xxd@zju.edu.cn

波电容的存在,其直流侧发生故障时,故障电压电流变化迅速,对系统造成严重威胁^[10-11]。VSC 直流侧的故障可以分为单极接地和两极短路故障。两极短路故障发生的概率虽然比单极接地故障低,但其后果更加严重。当VSC 直流侧发生两极短路故障时,IGBT 依靠自身保护闭锁,而与其反并联的续流二极管仍连接在电路中,有可能会受到短路电流的强烈冲击而损坏^[12]。

国内外现有文献对于VSC 直流侧短路故障的分析及保护策略的研究着眼于VSC 的外部特性,而少有从电力电子层面考虑故障发展过程^[13-16]。为深入探究VSC 换流器直流侧故障发展过程,本研究以VSC 直流侧两极短路故障为例,从电力电子层面分析故障电路响应特性,将故障过程定义为3个阶段,分析每个阶段的故障特征,提出故障电压、电流的计算方法,最后在PSCAD/EMTDC 环境下搭建±10 kV 直流线路两极短路故障模型,对理论分析进行了仿真计算验证。本研究的分析方法不具有电压等级的局限性,为基于VSC 的直流输、配电网继电保护配置和整定计算提供参考。

1 故障过程分析

VSC 直流侧任何位置发生两极短路故障都可以用等效电路进行分析^[17],等效电路如图1所示。VSC 采用典型的三相两电平拓扑结构,直流线路电缆采用π型等值模型。由于VSC 直流侧有大电容滤波,故此忽略电缆对地电容。

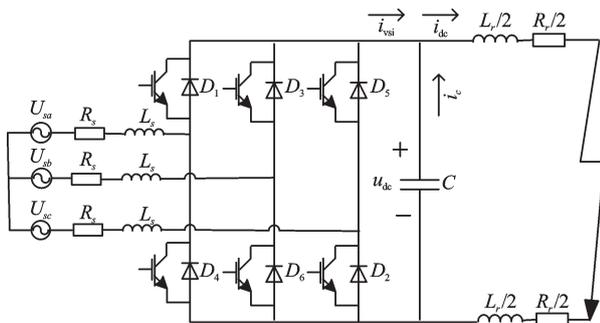


图1 直流线路两极短路时等效电路

L_r, R_r —换流器出口处到故障点正、负极线路的电感和电阻

VSC 直流侧两极短路故障瞬间,通过IGBT 的电流急剧上升,VSC 在自身保护作用下锁定IGBT,而与之反并联的续流二极管仍连接在电路中。初始时刻,由于直流电压高于交流线电压,交流侧向直流侧提供的短路电流只是限流电抗器的续流,直流侧的短路电流以电容快速放电为主。当直流电压下降到低于交流线电压峰值时,VSC 进入不控整流状态。交流侧通过续流二极管向直流侧提供的短路电流随直流电压的下降而逐渐增

大。若短路阻抗较大,当交流侧提供的短路电流超过直流侧短路电流时,电容停止放电而逐渐进入稳态。

若短路阻抗较小,不控整流的初始阶段可能出现续流二极管同时导通过程。短路阻抗较小时,电容放电阶段直流电压、电流变化迅速,交流系统提供的短路电流远小于直流侧短路电流,电容持续放电直至电压为零。直流侧短路电抗上形成的反电势在电容电压降为零的瞬间使VSC 三相桥臂续流二极管同时导通,直流侧形成自由放电回路,而交流侧相当于发生三相短路。若短路阻抗的电抗相对较大,有可能经历多次续流二极管同时导通过程。

根据直流线路两极短路故障电路响应特性,可以将故障过程分为3个阶段,即:直流侧电容放电阶段、不控整流初始阶段及不控整流稳态阶段。以下依次对各阶段进行了详细分析。为简化分析,本研究认为故障瞬间IGBT 锁定。

2 直流侧电容放电阶段

故障初始阶段,交流侧提供的短路电流远小于电容放电电流,忽略交流侧续流,直流侧电容、线路电感和电阻组成RLC 二阶放电电路。设故障瞬间电容电压即直流线路电压为 U_0 ,直流线路电流为 I_0 。故障后,对RLC 振荡回路有:

$$L_r C \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} + R_d C \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = 0 \quad (1)$$

式中: R_d —直流侧等效短路电阻。

当回路阻尼较小时,电容放电为二阶欠阻尼振荡过程,式(1)所示方程的解为:

$$u_{dc}(t) = e^{-bt} [A_1 \sin(\omega_d t) + A_2 \cos(\omega_d t)] \quad (2)$$

电容放电电流 $i_c(t)$ 为:

$$i_c(t) = C e^{-bt} [(A_1 \omega_d + A_2 b) \sin(\omega_d t) + (A_1 b - A_2 \omega_d) \cos(\omega_d t)] \quad (3)$$

其中: $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - b^2}$, $b = R_d / 2L_r$, $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_r C}$, $A_1 = U_0$, $A_2 = (C U_0 b - I_0) / C \omega_d$ 。

当短路阻抗较大时,电容放电过程将是二阶过阻尼衰减过程,求解过程同上,此处不再赘述。

3 不控整流初始阶段

当直流电压小于交流线电压峰值时,故障电路进入不控整流阶段,交流电源和电容同时向故障点放电。若短路阻抗较大,电容放电电流上升较缓,交流助增作用显著,整个电路在交流电源的作用下逐渐进入稳态。由于系统不会受到严重威胁,可以依靠交流断路器或直流断路器切除故障。

但当短路阻抗较小时,交流侧提供的短路电流在短时间内起不到主导作用,电容将持续放电直至电压为零。此时,直流侧短路电抗积蓄了大量能量,其上反电动势在电容电压降为零的瞬间使VSC的续流二极管同时导通,在直流侧形成RL一阶自由放电电路。与此同时,电容电压被二极管嵌位,保持为零,电流也为零,交流侧相当于发生三相短路。交、直流侧可以分解为两个相对独立的电路。

续流二极管在其同时导通瞬间会受到故障电流的严重的冲击,甚至损坏。续流二极管同时导通时等效电路如图2所示。为方便分析,以下分析中均以电容电压降为零时为 $t=0$ 的时刻。

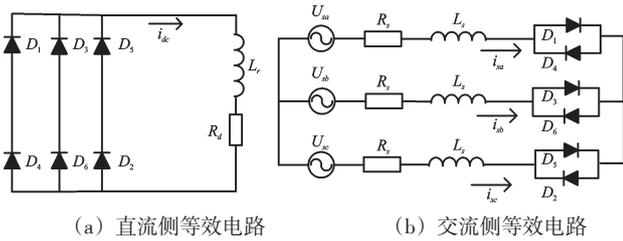


图2 续流二极管同时导通阶段等效电路图

3.1 直流侧等效电路分析

如前所述,直流侧短路电抗通过续流二极管形成RL一阶自由放电电路,短路电流持续衰减,等效电路如图2(a)所示。直流侧短路电流为:

$$i_{dc}(t) = A_2 e^{-\frac{R_d}{L_d}t} \quad (4)$$

式中: A_2 — 电容电压降为零的瞬间直流侧短路电流值。

由于三相桥臂续流二极管对于直流侧自由放电回路来讲完全等效,故三相桥臂二极管各流过 1/3 的直流侧自由放电电流。

3.2 交流侧等效电路分析

由于电容电压为零,电流也为零,换流器出口处两极直流线路等电位,交流侧相当于发生三相短路,等效电路如图2(b)所示。交流侧相电压与相电流关系为:

$$\begin{aligned} U_{sa} &= R_s i_{sa} + L_s \frac{di_{sa}}{dt} = U_m \sin(\omega t + \varphi_0) \\ U_{sb} &= R_s i_{sb} + L_s \frac{di_{sb}}{dt} = U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_0) \\ U_{sc} &= R_s i_{sc} + L_s \frac{di_{sc}}{dt} = U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_0) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: φ_0 — A 相交流电压在电容电压降为零的瞬间的相位。

可以解得 A 相短路电流表达式为:

$$i_{sa}(t) = I_{pm} \sin(\omega t + \varphi_0 - \varphi) + [I_{a0} - I_{pm} \sin(\varphi_0 - \varphi)] e^{-\frac{R_s}{L_s}t} \quad (6)$$

其中:

$$I_{pm} = \frac{U_m}{\sqrt{R_s^2 + (\omega L_s)^2}}, \quad \varphi = \arctan(\frac{\omega L_s}{R_s})$$

式中: I_{pm} — 短路电流周期分量的幅值; φ — 交流侧短路阻抗角; I_{a0} — 电容电压降为零时 A 相电流瞬时值。

交流侧短路电流由周期分量和非周期衰减分量组成。

同理可以推导其他两相短路电流表达式。由于每一相反并联的两个续流二极管完全相同,故各流过 1/2 的对应相短路电流。

3.3 续流二极管的过电流分析

与电缆线路相比,二极管对冲击电流的承受能力要小得多,续流二极管同时导通可能会对二极管造成严重冲击,甚至损坏二极管。由 3.1、3.2 节分析可知,二极管中受到的冲击电流一部分为直流侧自由放电电流,另一部分为交流侧短路电流,各个二极管中流过的短路电流并不相等。以 A 相上桥臂续流二极管 D_1 为例,其受到的冲击电流为:

$$i_{D1}(t) = \frac{1}{3} i_{dc}(t) + \frac{1}{2} i_{sa}(t) \quad (7)$$

为可靠保护二极管,必须依靠直流断路器在电容电压降为零前断开故障线路。定义故障发生到电容电压降为零的时间为 t_1 , 由式(2)可知:

$$t_1 = \frac{\pi - \theta}{\omega_d} \quad (8)$$

其中: $\theta = \arctan CU_0 \omega_d / (I_0 + CU_0 b)$ 。

4 不控整流稳态阶段

无论故障电路在不控整流初始阶段是否经历续流二极管同时导通过程,最终都会在交流电源的作用下逐渐达到稳态。稳态时,直流侧电容和线路电感组成滤波电路,直流电压为固定值,短路电流几乎为平直的直流电流,直流量线路电感在稳态时相当于导线,对交流侧短路电流的计算并没有影响。

4.1 交流侧短路电流的计算

稳态时,各相上、下桥臂二极管分别导通半个周期,换流器输出电压近似为方波。设此时直流侧电压为 U_d 。定义 A 相开关函数: A 相上桥臂打开时, $S_a = 1$; A 相下桥臂打开时, $S_a = 0$ 。B 相、C 相分别滞后 A 相 1/3 周期、2/3 周期。以 A 相为例,换流器 A 相输出电压可以表达为:

$$U_{ca} = \begin{cases} \frac{U_d}{2}, & S_a = 1 \\ -\frac{U_d}{2}, & S_a = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将 U_{ca} 用傅里叶级数展开,取其基波分量为:

$$U_{ca1} = \frac{2U_d}{\pi} \sin \omega t \quad (10)$$

忽略交流侧限流电抗器电阻,交流侧电压电流相

位关系如图3所示。由图3可知:

$$U_s = U_c + j\omega L_s I_s \quad (11)$$

稳态时交流侧相电流有效值 I_s 为:

$$I_s = \frac{\sqrt{U_s^2 - U_c^2}}{\omega L_s} \quad (12)$$

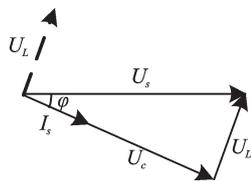


图3 交流侧电压、电流矢量关系

4.2 交流侧电流与直流侧电流函数关系

三相桥臂的开关函数是与换流器输出电压 U_{ca} 、 U_{cb} 、 U_{cc} 及交流侧电流 i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 对应相相位相同的方波。对开关函数进行傅里叶展开并取基波分量为:

$$\begin{aligned} S_{a1} &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \omega t \\ S_{b1} &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{c1} &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (13)$$

设交流侧三相电流为:

$$\begin{aligned} i_{sa} &= I_m \sin \omega t \\ i_{sb} &= I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{sc} &= I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (14)$$

则换流器向直流侧提供的短路电流为:

$$i_{rsi} = S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc} = \begin{bmatrix} S_a & S_b & S_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(13,14)代入式(15),可得:

$$i_{rsi} = \frac{3}{\pi} I_m \quad (16)$$

从4.1、4.2节的分析可知,交流侧电压、电流同直流侧电压、电流存在一定的函数关系,可以利用交流侧的保护装置对直流侧电压、电流进行动态监测,实现直流侧短路故障的后备保护。

5 仿真实验

本研究在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建了 ± 10 kV 直流线路两极短路故障仿真模型,系统参数如表1所示。换流器采用定直流电压和定无功功率的PI双环串级控制。在 $t=0.005$ s时设置直流线路两极短路故障。故障瞬间换流器 IGBT 锁定。

5.1 小故障电阻情况 ($R_f=0.2 \Omega$)

当短路阻抗较小时,电容电压快速降低到零,有

可能在故障过程的不控整流的初始阶段出现续流二极管同时导通的情况。为验证2、3、4节关于小故障电阻时的分析方法,选取 $R_f=0.2 \Omega$,仿真得到的故障时电压电流波形如图4所示。

表1 仿真系统参数

交流侧系统参数	直流侧系统参数
$U_{AC}=110$ kV	$U_{dc}=10$ kV
变压器 $k=110/11.5$ S=30 MVA	额定负载 $P=20$ MW
$R_f=0.2 \Omega$	$C=2$ mF
$L_s=2$ mH	$R=0.08 \Omega$
	$L_r=0.8$ mH

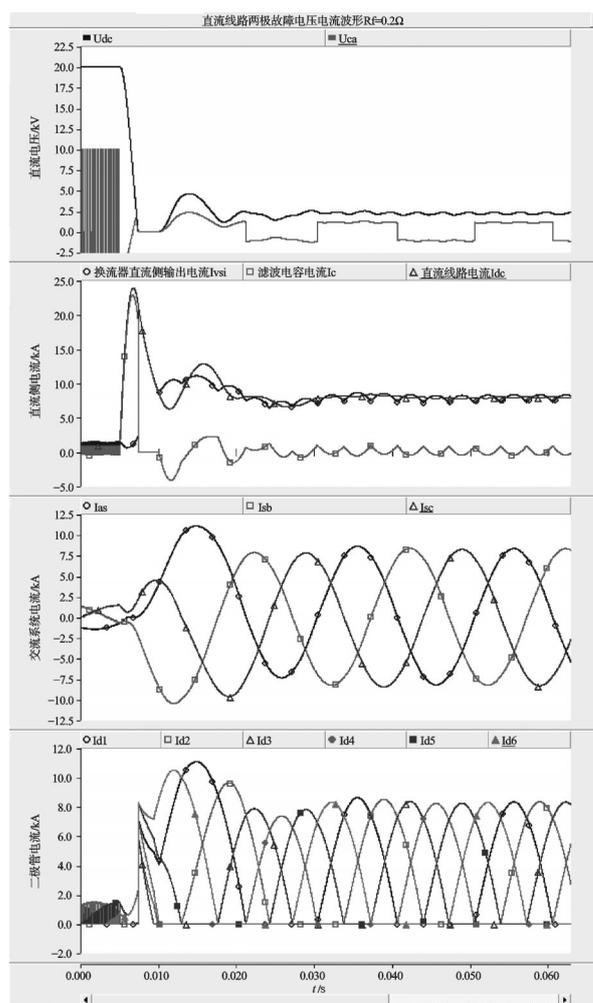


图4 短路阻抗较小时电压、电流波形

5.1.1 电容放电阶段

正常工作时,直流线路电压为 20 kV,电流为 1 kA。由式(2,3)可得电容放电阶段直流电压、电容放电电流表达式为:

$$u_{dc}(t) = e^{-173.76t} [20 \sin(771.24 t) + 3.86 \cos(771.24 t)] \quad (17)$$

$$i_c(t) = e^{-173.76t} [32.19 \sin(771.24 t) + \cos(771.24 t)] \quad (18)$$

选取 $t=0.006$ s进行验证(即上两式中 $t=0.001$ s),由式(17,18)计算得到直流电压为 14.04 kV,电容电流

为 19.46 kA, 与仿真得到的直流电压 14.39 kV、电容电流 19.50 kA 基本吻合。同时, 仿真得到的直流短路电流为 20.11 kA, 说明在电容放电阶段交流电源提供的短路电流确实远小于电容放电电流。电容放电阶段直流短路电流峰值为 23.94 kA, 约为正常工作时的 24 倍。

5.1.2 不控整流初始阶段

电容电压降为零的瞬间, 续流二极管同时导通, 通过二极管的电流瞬间增大(约为正常工作时电流峰值的 5.5 倍)。为验证第 3 节分析过程, 本研究选取 $t = 0.009$ s 时刻计算故障电流。

由式(4)得直流侧短路电流 $i_{dc} = 12.30$ kA, 与仿真结果 12.24 kA 基本相符。另外从图 4 也可以看出, 续流二极管同时导通阶段各二极管中流过的电流并不相同, 与前述分析相符。 $t = 0.009$ s 时各续流二极管电流计算值和仿真值如表 2 所示。

表 2 $t = 0.009$ s 时二极管电流值

	二极管	计算值/kA	仿真值/kA
A 相	D_1	5.083	5.084
	D_4	3.075	3.077
B 相	D_3	0.933	0.935
	D_6	7.225	7.226
C 相	D_5	6.221	6.223
	D_2	1.937	1.939

5.1.3 不控整流稳态阶段

图 4 中, U_{ca} 是换流器出口电压的波形。从图 4 中可以看出, 在不控整流稳态阶段, 由于直流侧电容和线路电感的滤波作用, 直流线路电流基本平直。直流电压有小范围波动, 谐波情况与短路阻抗有关。换流器出口电压 U_{ca} 近似为幅值为 $U_{dc}/2$ 的方波。稳态时, 交流侧相电压、相电流有效值分别为 4.28 kV、5.87 kA, 直流电压、电流分别为 2.20 kV、7.92 kA。

5.2 大故障电阻情况 ($R_f = 2 \Omega$)

当短路阻抗较大时, 电容放电回路阻尼很大, 直流电压及短路电流变化较缓, 当交流侧提供的短路电流等于直流侧短路电流时, 电容结束放电, 即不会出现续流二极管同时导通的过程。故障点不变, 取 $R_f = 2 \Omega$ 时故障电压电流波形如图 5 所示。

6 结束语

VSC 直流侧两极短路故障过程可以分为 3 个阶段: 第一阶段以电容快速放电为主, 持续时间一般为

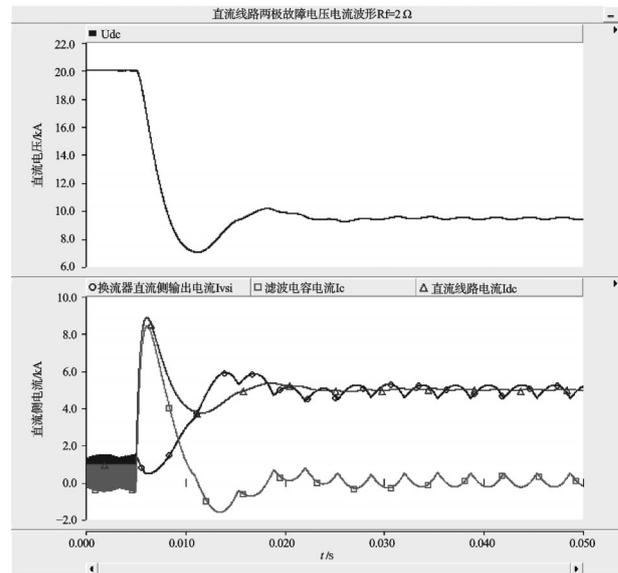


图 5 短路阻抗较大时电压、电流波形

几个毫秒, 在该阶段切除故障有助于整个系统快速恢复供电, 但要求能够在数毫秒内完成; 第二阶段情况复杂, 与短路阻抗大小密切相关。短路阻抗较小时, 电容电压迅速放电到零, 短路电抗上形成的反电势迫使续流二极管同时导通, 形成直流侧续流通路, 交流侧相当于发生三相短路; 短路阻抗较大时, 电容放电回路阻尼大, 直流侧短路电流上升缓慢, 交流助增作用明显。若在该阶段切除故障, 则必须考虑短路阻抗大小对故障过程的影响; 第三阶段交、直流侧电压、电流存在一定的函数关系, 可以利用交流侧的保护装置对直流侧电压、电流进行监测和计算, 实现直流侧短路故障的后备保护。

参考文献 (References):

- [1] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
- [2] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(5): 1499-1507.
- [3] NILSSON D, SANNINO A. Efficiency analysis of Low- and medium-voltage DC Distribution Systems [C]//IEEE Power and Energy General Meeting. Denver: IEEE, 2004: 2315-2321.
- [4] STARKE M R, TOLBERT L M, OZPINECI B. AC vs. DC Distribution: a Loss Comparison [C]//IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago: IEEE Computer Society, 2008: 1-7.

(下转第 544 页)

本文引用格式:

胡亮亮, 高一波, 严玉婷, 等. 电压源换流器直流侧短路故障特性分析[J]. 机电工程, 2014, 31(4): 512-516, 544.

HU Jing-jing, GAO Yi-bo, YAN Yu-ting, et al. DC side short-circuit fault analysis of VSC[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(4): 512-516, 544.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

域水动力特性的模拟以及海水潮汐流中物质移动扩散的计算,对开发港口、维护航道及建造海洋建筑物有指导作用^[10]。

(3) 在 ADCP 走航试验中,由于各点流速均不是在同一时刻采集的,不能保证同时性,但由于每个出、入口的流速点测量时间较近,故本研究在数值模拟过程中对出、入口速度进行了平均处理。

(4) 由于本次模拟并没有考虑风力、波动等外界因素的影响,计算结果仍存在一定的误差。

参考文献(References):

- [1] 寿玮玮. 舟山群岛附近海域水动力特征及其对物质运输的影响分析[D]. 青岛:中国海洋大学海洋地球科学学院, 2009.
- [2] 王智峰,周良明,张弓贲,等. 舟山海域特定水道潮流能估算[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(8): 27-33.
- [3] 王兆忠,李伟朝,王定元. 舟山群岛新能源开发利用现状

- 和前景[J]. 可再生能源, 2009, 27(4): 112-114.
- [4] 马启南,陈永平,张金善,等. 杭州湾的三维水流数值模拟[J]. 海洋工程, 2001, 19(4): 58-66.
- [5] 寿玮玮,吴建政,胡日军,等. 舟山群岛附近海域三维水动力数值模拟[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(11): 1-9.
- [6] CHEN C T, MILLERO F J. The equation of state of seawater determined from sound speeds[J]. **Journal of Marine Research**, 1978, 36(4): 657-691.
- [7] 李身铎,胡 辉,黄丽萍,等. 杭州湾 M-2 潮的数值模拟[J]. 海洋学报, 1986, 8(2): 232-241.
- [8] 杨陇慧,朱建荣,朱首贤. 长江口杭州湾及邻近海区潮汐潮流场三维数值模拟[J]. 华东师范大学学报, 2001(3): 74-84.
- [9] 许雪峰,施伟勇,孙志林,等. 穿山半岛北侧近岸“回流”现象的二维数值模拟[J]. 海洋学研究, 2011(1): 84-89.
- [10] 胡日军. 舟山群岛海域泥沙运移及动力机制分析[D]. 青岛:中国海洋大学海洋地球科学学院, 2009.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

秦华伟,蔡 真,周红伟,等. 舟山特定海域三维水流数值模拟研究[J]. 机电工程, 2014, 31(4): 541-544.

QIN Hua-wei, CAI Zhen, ZHOU Hong-wei, et al. Three-dimensional numerical simulation of Zhoushan area[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(4): 541-544.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 516 页)

- [5] STARKE M R, FANGXING L, TOLBERT L M, et al. AC vs. DC distribution: maximum transfer capability [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-6.
- [6] 李晓珂,徐 政,卢 睿,等. 多馈入直流对上海电网稳定性影响的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(11): 57-60.
- [7] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [8] GUANGKAI L, GENGYIN L, CHENGYONG Z, et al. Research on Voltage Source Converter based DC Distribution Network [C]// 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2007). Harbin: IEEE, 2007: 1927-1932.
- [9] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2009, 24(3): 592-602.
- [10] JIE Y, JIANCHAO Z, GUANGFU T, et al. Characteristics and Recovery Performance of VSC-HVDC DC Transmission Line Fault [C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Chengdu: IEEE Computer Society, 2010: 1-4.
- [11] CANDELARIA J, JAE-DO P. VSC-HVDC system protection: a review of current methods [C]// IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE). Phoenix: IEEE Computer Society, 2011: 1-7.
- [12] JIN Y, FLETCHER J E, O'REILLY J. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2010, 25(4): 2308-2318.
- [13] NANAYAKKARA O M K K, RAJAPAKSE A D, WACHAL R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2012, 27(4): 2286-2294.
- [14] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
- [15] 蔡新雷,宋国兵,高淑萍,等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 112-119.
- [16] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. 利用电流频率特性的 VSC-HVDC 直流输电线路纵联保护[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1989-1996.
- [17] JIN Y, FLETCHER J E, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2012, 59(10): 3827-3837.

[编辑:李 辉]