

柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究

孙晓云¹, 高鑫², 刘延华³

(1. 西安科技大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048;
3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: 为了准确识别柔性直流输电电压源换流器故障类型及位置, 在分析换流器故障特性的基础上, 给出了一种简便快速的故障识别及定位方法。基于两电平电压源换流器的 VSC-HVDC 的系统仿真, 分别建立了交流侧单相断线故障时直流电压、直流电流波动分量计算模型和两侧换流器故障交流电流计算模型, 分析了故障换流器交流侧谐波与直流侧谐波分量的关系, 给出了柔性直流输电换流器故障谐波传递规律。根据已建立的故障换流器数学模型和交直流侧谐波传递规律, 以直流电流各次谐波分量、交流电流有效值和标么化直流分量作为诊断特征量, 提出了一种运算简便快速的故障定位方法, 可用于识别电压源换流器中轻微故障的位置。仿真结果表明, 提出的故障识别及定位方法能够在线实时准确地诊断电压源换流器轻微故障类型和位置, 诊断时间最多需要 35 ms。

关键词: VSC-HVDC; 电压源换流器; 故障特性; 故障谐波传递规律; 故障定位

VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC

SUN Xiaoyun¹, GAO Xin², LIU Yanhua³

(1. College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Subsection of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: In order to recognize voltage source converter (VSC) of VSC-HVDC system fault type and fault location, a simple and rapid method for fault discrimination and location is presented after the analysis of fault characteristics of converter. Based on the system simulation of two-level VSC-HVDC, the DC voltage and DC current fluctuation components mathematical calculation models and two sides AC fault current mathematical calculation models under condition of single-phase disconnection fault are built respectively, the relationship between AC and DC side harmonics is analyzed, and then the VSC fault harmonic transfer law is obtained. According to the VSC fault mathematical models and harmonic transfer law, the harmonic components of DC current, RMS value of AC current and normalized DC component are taken as diagnosis characteristic quantities, then a simple and high-speed fault location method is put forward to identify minor fault locations. The simulation results show that the method presented for fault discrimination and location can accurately identify minor fault type and fault location of VSC in real time, the diagnosis time is up to 35 ms.

This work is supported by Scientific Research Program of Shaanxi Education Department (No. 15JK1477).

Key words: VSC-HVDC; voltage source converter; fault characteristics; fault harmonic transfer law; fault location

0 引言

柔性直流输电系统(VSC-HVDC)是以电压源换流器(VSC)为核心并结合 PWM 技术产生的一种新型直流输电技术^[1], 该技术具有能快速独立地控制有功及无功、提高系统的电压及频率稳定性的优势, VSC-HVDC 是光伏、风力发电与交流主网互联的理想接入设备^[2-7]。

电压源换流器作为 VSC-HVDC 最重要的组成

部分, 它使用新的全控型 IGBT 电力电子器件其价格相对昂贵, 一旦损坏需要大量更换器件并造成大量经济损失, 另外器件故障极易造成系统运行混乱, 危及人身和设备的安全^[8-9]。所以控制、保护和故障诊断是电力电子装置的核心, 必须进行合理的设计来保证系统安全运行^[10-11], 而故障诊断就成为初期系统设计的必要环节。

目前 VSC-HVDC 故障诊断方面, 文献[12]研究了随机噪声对两电平的 VSC-HVDC 系统故障信号的影响, 提出利用支持向量机实现换流器的故障类型识别。文献[13]仿真研究了基于两电平换流器的

VSC-HVDC 系统的常见故障,结合故障仿真结果利用人工神经网络实现了换流器故障类型识别。VSC-HVDC 系统由两侧电压源换流器协调控制运行,任一侧换流器的故障不仅影响到该侧换流器,还要导致另一侧换流器异常工作,系统故障运行机理复杂,因此有必要对换流器故障的发生、发展过程中系统主要部件的电压电流变化规律进行分析,研究故障现象背后的换流器故障运行机理,并在此理论基础上寻找合适故障诊断判据。

本文以基于两电平电压源换流器的 VSC-HVDC 系统为研究对象,在重点分析换流器交流侧单相断线故障的系统运行特性基础上理论推导出柔性直流输电系统的故障谐波传递规律,结合理论研究成果研究柔性直流输电换流器的故障诊断策略,重点提出一种运算简便快速的故障定位方法识别轻微故障的故障位置。

1 换流器交流单相断线故障机理分析

由于电气设备载流部分的绝缘老化、过热、腐

蚀以及其它工艺原因,可能导致电压源换流器换流器交流相断开,造成系统缺相运行。本文以换流器交流单相断线故障为例结合仿真结果研究分析系统运行故障机理及换流器故障谐波传递规律。

1.1 换流器交流单相断线故障仿真

基于 PSCAD 仿真软件建立两电平 VSC-HVDC 系统,系统拓扑图及各物理量的参考方向如图 1 所示。图中左侧的换流站为送端站,右侧的换流站为受端站,相应的物理量分别以下标“1”和“2”表示。仿真示例结构参数为:三相交流系统电压为 10 kV;直流额定电压为 20 kV;交流滤波电感为 10 mH;直流支撑电容为 500 uF。系统采用背靠背运行方式、幅相控制策略,送端换流器采用定有功功率、定无功功率控制方式,受端换流器采用定直流电压、定无功功率的控制方式。仿真过程中,系统有功功率设定为 5 MW,送端无功功率 1 MVar,受端无功功率-1 MVar。

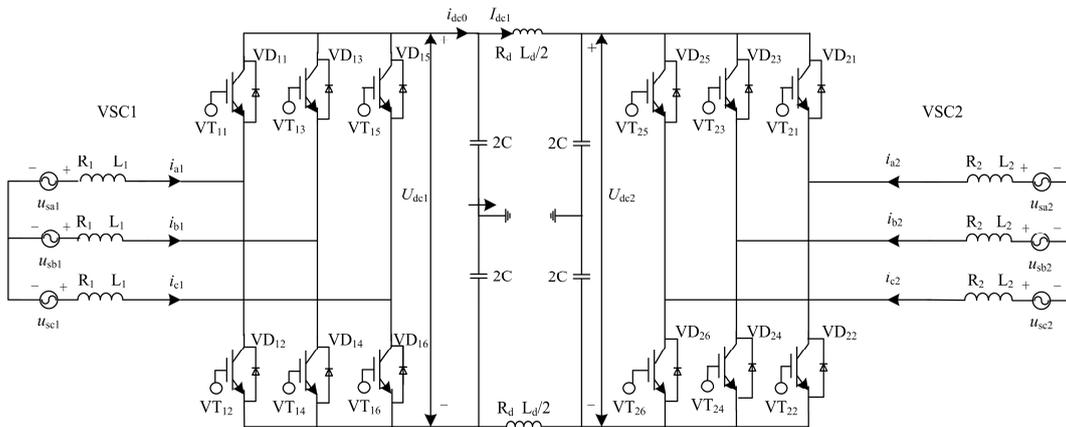


图 1 VSC-HVDC 系统拓扑图

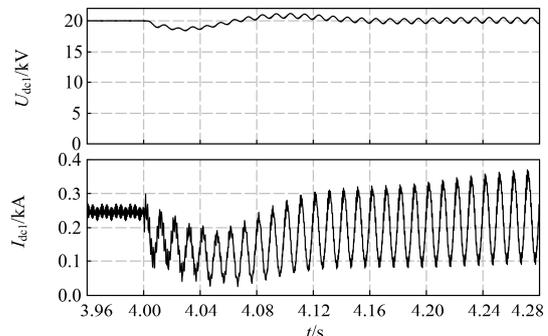
Fig. 1 Topology of VSC-HVDC system

图 2 给出了 4 s 送端换流器 A 相交流断线故障的仿真波形,从图可以看出:1)直流电压出现了小幅度衰减振荡,最大波动幅值下降到额定值 95%左右,直流电压明显包含 2 倍工频波动分量;2)直流电流出现了大幅度衰减振荡,最大波动下降到额定电流 20%左右,直流电流也包含 2 倍工频波动分量;3)送端三相交流电流严重不平衡,A 相电流为 0,B 相、C 相电流反相,且幅值逐渐增大到额定值的 1.5 倍;4)受端三相交流电流也出现不平衡,包含了负序分量。

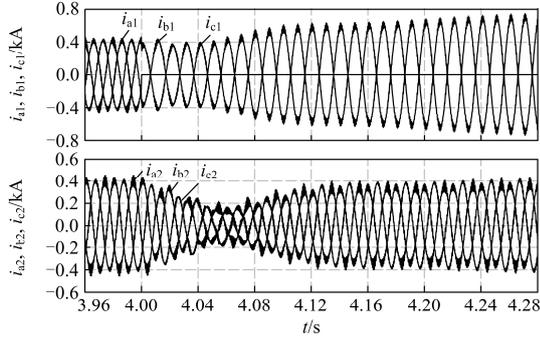
1.2 交流单相断线故障的系统运行机理分析

由图 2 换流器单相断线故障仿真结果看出,当系统任意一侧换流器发生交流单相断线故障,三相

电流的不平衡必将影响到直流功率的平稳性及直流电压的稳定性,由此会通过直流线路的耦合进一步影响到另一侧换流器的交流电流特性。



(a) 直流电压、直流电流波形



(b) 换流器交流电流波形

图 2 交流单相断线故障仿真结果

Fig. 2 Single-phase disconnection fault simulation results

a) 故障侧换流器直流电压波动

以换流器 VSC1 的 C 相断线故障为例分析, 断线故障后 C 相电流为 0, 忽略其他谐波分量故障后交流电流可以表示为

$$\begin{cases} i'_{a1}(t) = \sqrt{2}I' \sin(\omega_0 t + \varphi') \\ i'_{b1}(t) = -\sqrt{2}I' \sin(\omega_0 t + \varphi') \\ i'_{c1}(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 φ' 为交流电流相对于 VSC1 侧电源电压的相位角。

根据 PWM 的调制原理, 换流器电流开关函数 ($S_{ik}, k=a, b, c$)^[3]描述如下:

$$s_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ 0 & \text{下桥臂导通} \end{cases}$$

忽略开关函数高频分量, PWM 电流开关函数表示如下:

$$\begin{bmatrix} s_{ia} \\ s_{ib} \\ s_{ic} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \lambda_1 \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \delta_1) \\ \sin(\omega_0 t - 120^\circ + \delta_1) \\ \sin(\omega_0 t + 120^\circ + \delta_1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

故障后换流器 VSC1 满足:

$$i_{dc0} = s_{ia} \cdot i'_{a1}(t) + s_{ib} \cdot i'_{b1}(t) + s_{ic} \cdot i'_{c1}(t) \quad (3)$$

把式(1)和式(2)带入式(3), 推出:

$$i_{dc0} = \frac{\sqrt{6}}{4} I' \lambda_1 [\sin(2\omega_0 t + \varphi' + \delta_1 - 60^\circ) + \sin(\varphi' - \delta_1 + 60^\circ)] \quad (4)$$

由式(4)看到, 换流器出现一相断线故障后直流电流一定包含 2 次谐波波动分量。

假定系统直流电压为额定值, 忽略直流输电线路阻抗, 直流输电系统换流器 VSC1 等值电路如图 3 所示。

图 3 中虚拟电阻 R_{eq} 可由额定直流电压 U_{dcN} 和额定有功功率 P_N 按下式计算:

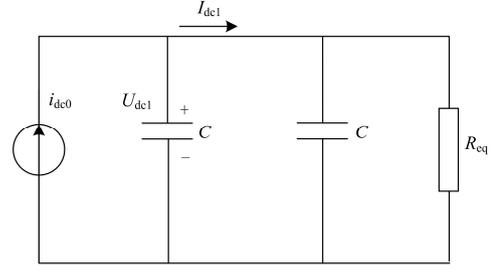


图 3 换流器 VSC1 等值电路

Fig. 3 VSC1 equivalent circuit

$$R_{eq} = \frac{U_{dcN}^2}{P_N}$$

根据式(4), 直流电流 i_{dc0} 含有 2 倍频波动分量 ($\sqrt{6}/4 \times I' \lambda_1 \sin(2\omega_0 t + \varphi' + \delta_1 - 60^\circ)$), 因图 3 换流器等值电路有 2 个相等的滤波电容 C , 换流器 VSC1 滤波电容 C 滤除约一半的 2 倍频分量后直流输电线路电流 I_{dc1} 含有约 i_{dc0} 的 2 倍频波动分量一半, 直流输电线路电流 I_{dc1} 的 2 倍频波动分量幅值为 $d_1 = \sqrt{6}I'\lambda/8$ 。

由图 3 可知直流电流 i_{dc0} 与直流侧电压满足:

$$i_{dc0} = 2C \frac{du_{dc1}}{dt} + \frac{u_{dc1}}{R_{eq}} \quad (5)$$

若仅考虑式(4)中直流电流 i_{dc0} 的 2 倍频波动分量, 把式(4)带入式(5)求解方程, 整理计算得到换流器 VSC1 直流电压波动分量为

$$\Delta u_{dc1} = \frac{\sqrt{6}\lambda_1 I'}{16C\omega_0} \sin(2\omega_0 t + \varphi' + \delta_1 - 60^\circ - \beta) \quad (6)$$

式(6)中 $\beta = \arccos(1/\sqrt{1+16R_{eq}^2 C^2 \omega_0^2})$ 。公式表明 VSC-HVDC 电压源换流器单相断线故障导致了该侧直流电压出现二次谐波波动分量, 直流电压 2 次谐波波动分量与故障侧换流器的 PWM 的调制深度、故障相电流基波幅值成正比例关系, 与电容成反比例关系。

b) 非故障换流器交流电流畸变

忽略直流线路参数的影响, 非故障侧换流器直流电压等于故障侧换流器直流电压, 设因 VSC1 交流侧断线故障引起换流器 VSC2 直流电压 U_{dc2} 的波动分量为

$$\Delta u_{dc2} = d_2 \sin(2\omega_0 t + \theta) \quad (7)$$

式中 $d_2 = \sqrt{6}\lambda_1 I'/16C\omega_0$, θ 为基波分量相对于换流器 VSC2 电源电压的相位角, 该参数与故障发生的时刻密切相关。

假定故障后换流器 VSC2 电压开关函数^[3]为

$$\begin{bmatrix} s_{ua} \\ s_{ub} \\ s_{uc} \end{bmatrix} = \lambda_2 \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \delta_2) \\ \sin(\omega_0 t - 120^\circ + \delta_2) \\ \sin(\omega_0 t + 120^\circ + \delta_2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： δ_2 为开关函数的基频分量相对于电源电压的相位角； λ_2 为 PWM 的调制深度。

依据 VSC-HVDC 系统工作原理，由直流电压 2 次谐波分量引起的换流器 VSC2 交流侧电压为

$$\begin{bmatrix} u'_{ca} \\ u'_{cb} \\ u'_{cc} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \Delta u_{dc2} \begin{bmatrix} s_{ua} \\ s_{ub} \\ s_{uc} \end{bmatrix} = -\frac{\lambda_2 d_2}{4} \begin{bmatrix} \cos(3\omega_0 t + \theta + \delta_2) \\ \cos(3\omega_0 t - 120^\circ + \theta + \delta_2) \\ \cos(3\omega_0 t + 120^\circ + \theta + \delta_2) \end{bmatrix} + \frac{\lambda_2 d_2}{4} \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \theta - \delta_2) \\ \cos(\omega_0 t + 120^\circ + \theta - \delta_2) \\ \cos(\omega_0 t - 120^\circ + \theta - \delta_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

忽略等效电阻 R ，得到交流侧三相电流的波动分量为

$$\begin{bmatrix} i'_{a2} \\ i'_{b2} \\ i'_{c2} \end{bmatrix} = -\frac{\lambda_2 d_2}{12\omega_0 L} \begin{bmatrix} \sin(3\omega_0 t + \theta + \delta_2) \\ \sin(3\omega_0 t - 120^\circ + \theta + \delta_2) \\ \sin(3\omega_0 t + 120^\circ + \theta + \delta_2) \end{bmatrix} + \frac{\lambda_2 d_2}{4\omega_0 L} \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \theta - \delta_2) \\ \sin(\omega_0 t + 120^\circ + \theta - \delta_2) \\ \sin(\omega_0 t - 120^\circ + \theta - \delta_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

从式(10)看出，直流电压 2 次谐波分量一定在换流器交流电流中产生 3 次谐波正序分量和基波负序分量。考虑到 3 次谐波正序分量只是基波负序分量的 1/3，3 次谐波正序分量忽略不计，整理得到：

$$\begin{bmatrix} i'_{a2} \\ i'_{b2} \\ i'_{c2} \end{bmatrix} = d_3 \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \theta - \delta_2) \\ \sin(\omega_0 t + 120^\circ + \theta - \delta_2) \\ \sin(\omega_0 t - 120^\circ + \theta - \delta_2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中 $d_3 = \sqrt{6}\lambda_1\lambda_2 I' / 64\omega_0 LC$ ，公式表明 VSC-HVDC 系统一侧换流器的单相故障导致另一侧换流器的交流电流出现三相不平衡，交流电流包含基波负序分量，其幅值 d_3 与故障换流器的调制深度、故障相电流直流分量、非故障换流器电流的调制深度成线性关系。

单相断线故障仿真波形如图 4 所示，其仿真参数为有功功率设定为 5 MW，送端无功 2 MVar，受端 -2 MVar，4s 时送端换流器 C 相发生故障。由图 4(a) 看到故障后送端出口直流侧电压 U_{dc1} 出现了 2 次谐波分量其波动幅度约为 0.15 kV，与理论计算的稳态直流电压波动幅值 $d_2 = \sqrt{6}\lambda_1 I' / 16C\omega_0 = 0.143$ kV 基本符合；故障后送端直流输电线路电流 I_{dc1} 也出现了 2 次谐波分量其波动幅值为 0.14 kA，与理论计算的稳

定直流电流波动幅值 $d_1 = \sqrt{6}I'\lambda/8 = 0.154$ kA 基本符合。由图 4(b)故障后受端换流器出现了基频负序波动分量其稳定的波动幅值约为 0.0027 kA，与理论计算的波动幅值 $d_3 = \sqrt{6}\lambda_1\lambda_2 I' / 64\omega_0 LC = 0.0029$ kA 也基本相符。

柔性直流输电换流器受端换流器单相断线故障仿真情况与送端换流器断线故障的仿真情况相似，均是故障导致直流线路的直流电压、直流电流出现 2 次谐波分量，而非故障侧换流器的三相交流电流出现了基波负序分量，鉴于篇幅限制不再给出仿真结果。

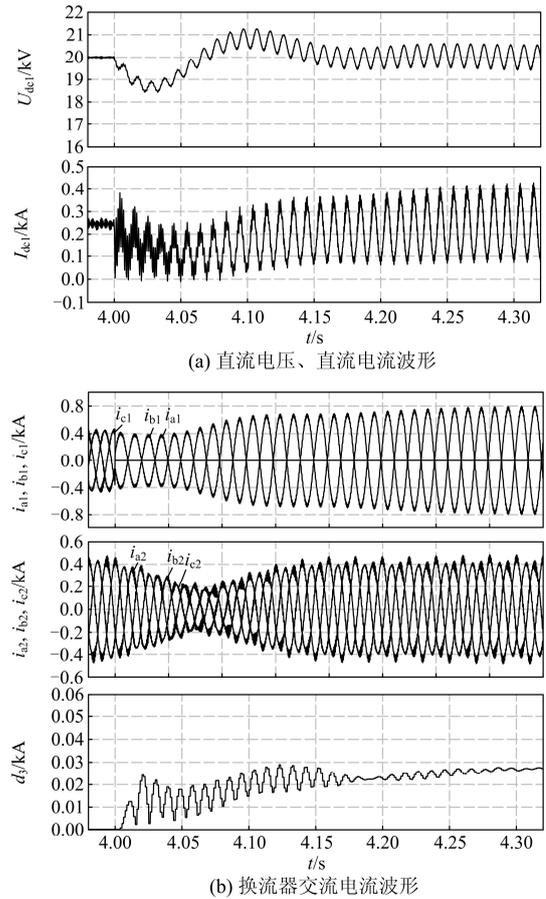


图 4 单相断线故障谐波传递仿真结果

Fig. 4 Simulation results of single phase disconnection fault harmonic transmission

2 柔性直流输电换流器故障谐波传递规律

根据换流器交流单相断线故障机理分析及式(5)换流器交直流侧参数运算关系得出如下结论：换流器一侧发生故障，交流侧包含频率为 ω 的谐波分量在与换流器开关函数基频分量 ω_0 作用后直流侧及另一侧换流器交流分量都会产生谐波分量，系统谐

波产生规律为故障交流侧频率为 ω 的正序分量会在直流侧产生 $\omega-\omega_0$ 的分量, 故障交流侧频率为 ω 的负序分量会在直流侧产生 $\omega+\omega_0$ 的分量, 直流侧频率为 ω 的分量作用于另一换流器, 交流侧产生 $\omega+\omega_0$ 的正序分量及 $\omega-\omega_0$ 的负序分量。若 n 为谐波次数, 谐波传递规律如图5所示。

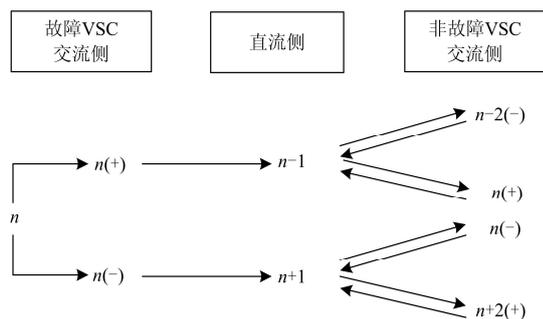


图5 换流器故障谐波传递规律

Fig. 5 VSC fault harmonic transfer rules

3 柔性直流输电换流器故障诊断定位

作为一个庞大且复杂的系统, 柔性直流输电系统可能发生故障的部位以及故障的类型有许多, 电压源换流器常见故障^[14]包括交流侧单相断线、IGBT 阀开路故障、IGBT 阀短路故障等。

分析图1的VSC-HVDC系统电路拓扑图可知, 换流器发生开路型故障如交流单相断线或IGBT失效开路, 换流器没有出现过电压、过电流现象, 换流器故障后果轻微可以认为属于非破坏性故障; 而换流器发生短路型故障如IGBT阀短路失效故障、桥臂直通故障等, 换流器通过故障点对直流侧电容形成放电通路, 出现了严重的过电流现象可以认为属于破坏性故障。

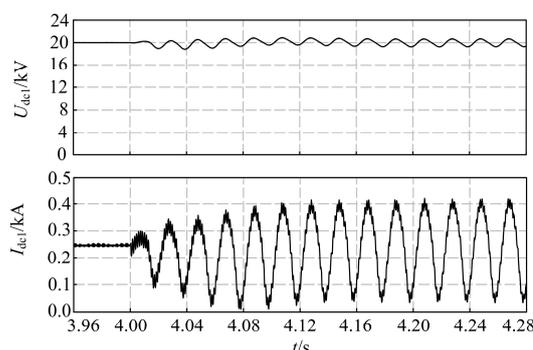
换流器的破坏性故障会出现非常严重的过电流现象且故障常常是永久性的, 此时无论采用何种控制方式来抑制故障都达不到理想效果^[15], 应依据“先保护, 后诊断”原则直接闭锁故障换流器的全部IGBT器件并实施交流系统的跳闸动作退出运行, 再结合故障保护前、故障保护后的电压电流信号及故障保护硬件信息一起识别故障。

换流器的非破坏性故障不会出现过电压、过电流现象, 换流器不需要进行保护仍然能运行一段时间, 此时可根据无故障保护下故障诊断算法实时诊断定位, 本文将重点研究提出一种非破坏性故障的在线定位算法。

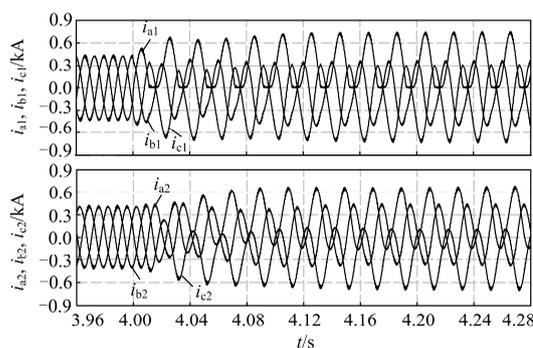
3.1 IGBT 阀开路故障特征

非破坏性故障包括换流器交流断线故障(简称F1)和IGBT阀失效开路故障(简称F2)。图6给出了

送端换流器A相上半桥臂在4s时发生IGBT阀开路的仿真波形, 由图6(a)看出故障后直流侧电压包含了工频波动分量, 波动幅度达到3%左右; 直流侧电流也包含了工频波动分量, 波动幅度较大。由图6(a)送端换流器故障相电流只有正半波, 包含直流分量, 而非故障相电流同样包含直流分量; 受端三相交流电流受其故障影响, 也明显包含直流分量。



(a) 直流电压、直流电流波形



(b) 换流器交流电流波形

图6 IGBT 失效开路故障仿真结果

Fig. 6 IGBT open-circuit fault simulation results

柔性直流输电换流器的IGBT失效开路故障特征明显^[16], 故障会造成直流电压、直流电流出现明显基频波动分量; 故障侧换流器其故障相电流为单极性波, 上桥臂IGBT阀开路的故障相电流只有正半周, 下桥臂IGBT阀开路其故障相电流只有负半周, 而非故障换流器的非故障相电流正弦度较好, 但也出现了直流量其直流量约为故障相的一半; 非故障换流器也异常运行都出现直流分量, 但每一相交流电流在一个周期内既有正的幅值也有负的幅值, 直流分量相对较小。

依据换流器IGBT失效开路故障特性, 以交流侧三相电流的标幺化直流分量为故障定位特征参数。设 $x(n)$ 为VSC-HVDC网侧送端(受端)任意一相电流信号的采样值, 以式(12)计标幺化处理交流电流的直流分量, 得到故障定位特征 $E(n)$ 。

$$E(n) = \frac{\sum_{m=n-N+1}^n x(m)}{\sum_{m=n-N+1}^n |x(m)|} \quad (12)$$

系统正常运行，网侧交流电流信号为正弦基波信号，交流电流直流量为0，定位特征变量 $E(n)$ 全部为0；系统一侧换流器上(下)桥臂IGBT阀故障，故障相电流只有正(负)半个周波，故障相定位特征变量 $E(n)$ 为1(-1)；但是所有非故障相交流电流波形在一个周期内既有正幅值也有负幅值，直流分量相对故障相较小，仿真结果表明非故障相定位特征变量 $E(n)$ 围基本不受电流幅值的影响，非故障相电流诊断变量范围在(0, ±0.91)，所以可以依据交流电流定位特征变量 $E(n)$ 的大小定位IGBT故障。

3.2 换流器诊断故障定位方法

换流器 F1 交流断线故障明显的故障特征是系统直流电压、电流出现明显的二次谐波分量，且换流器故障相电流为0；而换流器 F2 的 IGBT 失效开路故障明显的特征是系统直流电压、电流出现了明显的基频分量，且换流器故障相电流的特征参数 $E(n)$ 为1(或-1)，考虑以换流器输出口的直流电压电流、换流器三相交流电流作为故障定位信号。由于换流器故障后直流电流的谐波相对于直流电压谐波更为明显，所以选取换流器直流电流和三相交流电流作为非破坏性故障定位信号实现故障定位。为此本文提出一种非破坏性故障定位算法，该算法实时计算直流电流各次谐波分量、交流电流有效值和标么化直流分量后利用层次化方法识别故障类型和故障位置。

故障定位时两侧换流器之间不需要通信，两侧换流器故障诊断CPU模块实时采集 n 时刻各自直流电流 $I_{dcy}(n)$ ($y=1,2$)和三相交流电流 $i_{xy}(n)$ ($x=a, b, c; y=1, 2$)后利用故障诊断算法实施诊断，具体故障诊断定位过程如下所示：

(1) 以式(13)标么化预处理得到 $I_{dcy}^*(n)$ ($y=1, 2$)、 $i_{xy}^*(n)$ ($x=a, b, c y=1,2$)，式中 P_{Ny} 、 Q_{Ny} 、 U_y ($y=1, 2$)分别为两侧换流器额定有功功率、额定无功功率及电源线电压有效值， U_{dcN} 为额定直流电压。

(2) 利用FFT(快速傅里叶变换)计算直流电流的基频分量 $I_{dcy-1}^*(n)$ 和2次谐波分量 $I_{dcy-2}^*(n)$ 。

(3) 以式(14)计算交流电流有效值 $I_{xy}^*(n)$ ($x=a, b, c y=1,2$)，以式(15)计算标么化直流分量 $E_{xy}(n)$ ($x=a, b, c y=1,2$)，以 $I_{xy}^*(n)$ 作为F1故障定位的主要特征变量，以 $E_{xy}(n)$ 作为F2故障定位的主要特征变量。

(4) 采用层次化方法辨识破坏性故障的类型及

位置，具体故障诊断流程如图7所示。

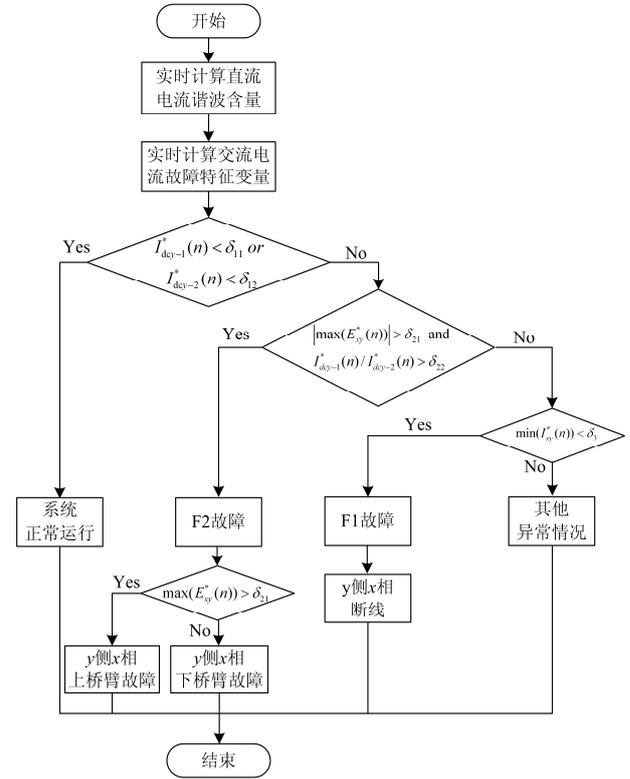


图7 换流器故障类型识别和定位流程图

Fig. 7 VSC fault type recognition and positioning process diagram

$$I_{dcy}^*(n) = \frac{I_{dcy}(n)}{P_{Ny}/U_{dcN}} \quad (13)$$

$$i_{xy}^*(n) = \frac{i_{xy}(n)}{\sqrt{P_{Ny}^2 + Q_{Ny}^2} / \sqrt{3}U_y}$$

$$I_{xy}^*(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=n-N+1}^n i_{xy}^*(m)^2} \quad (14)$$

$$E_{xy}(n) = \frac{\sum_{m=n-N+1}^n i_{xy}^*(m)}{\sum_{m=n-N+1}^n |i_{xy}^*(m)|} \quad (15)$$

其中，图7故障类型识别和定位流程图中的 δ_{11} 、 δ_{12} 、 δ_{21} 、 δ_{22} 、 δ_3 为阈值参数。

δ_{11} 、 δ_{12} 确定换流器是否发生故障，通过大量故障仿真后确定阈值参数 δ_{11} 、 $\delta_{12}=0.2$ 。

δ_{21} 、 δ_{22} 确定是否为F2的IGBT阀开路故障。 δ_{21} 可以根据故障诊断变量 E_{xy} 范围确定，当换流器出现F2故障其故障相电流的诊断变量 E_{xy} 值为±1，而非故障相诊断变量 E_{xy} 其范围在(0, ±0.91)之间，

考虑到系统噪声的影响选择 δ_{21} 为 0.96。 δ_{22} 的确定需要以 F2 换流器滤波后直流电流基波与 2 次谐波的比例作为理论依据。理论分析表明直流电流基波与 2 次谐波比例系数比为 $12/\pi$, 考虑到定位快速性 δ_{22} 也取小的值选择阈值 δ_{22} 为 3。

δ_3 确定故障是否为 F1 交流断线故障。系统 F1 交流断线故障时故障相电流为 0, 故障相电流有效值也为 0, 考虑 0.1% 的测量误差选择阈值参数取 δ_3 为 0.005。

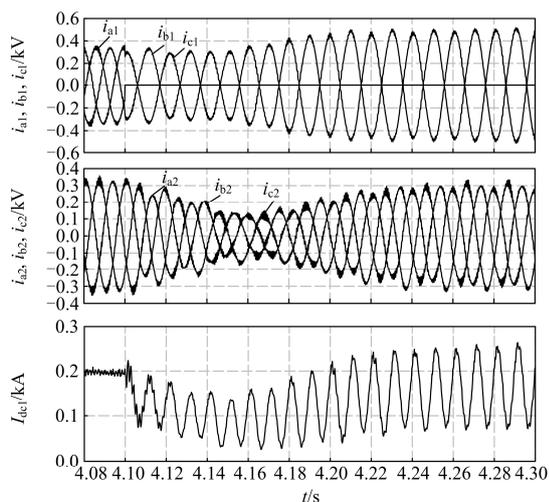
4 换流器故障诊断定位仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 软件环境下仿真提取换流器定位所需信号后利用 MATLAB 软件仿真验证故障定位算法的有效性。仿真时直流电压设定值 20 kV, 有功无功设定值 4 MW/1 MVar, 4.1 s 送端换流器故障。定义 F1 故障送端报警信号为 F1-alarm1, 受端报警信号为 F1-alarm2; F2 故障送端报警信号为 F2-alarm1, 受端报警信号为 F2-alarm2。

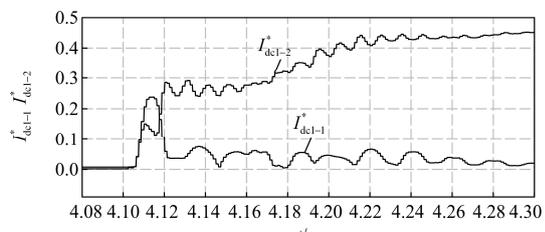
4.1 交流侧断线故障定位仿真及结果分析

图 8 给出了 F1 的 A 相故障仿真波形及仿真结果, 分析发现:

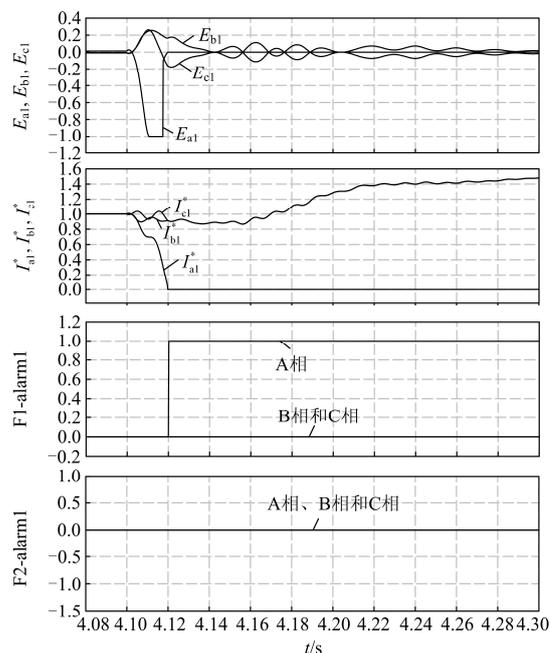
1) 图 8(a) 两侧交流电流和直流电流波形中, 故障后送端 A 相交流电流为 0, B、C 相电流大小相等, 方向相反, 受端交流电流受故障影响出现了基波负序分量, 直流电流出现了明显的 2 次谐波分量。



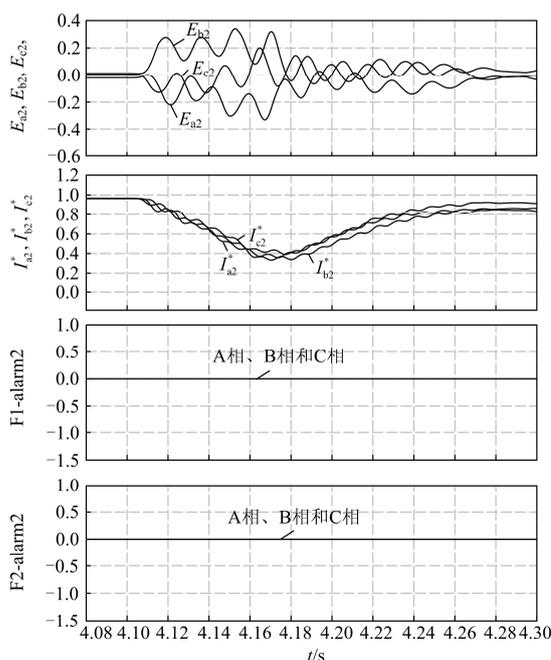
(a) 两侧交流电流及直流电流波形



(b) 标么化直流电流谐波随时间变化曲线



(c) 送端故障特征参数及诊断结果



(d) 受端故障特征参数及诊断结果

图 8 F1 交流断线故障仿真结果

Fig. 8 F1 single-phase disconnection fault simulation results

2) 图 8(b) 标么化直流电流谐波分量中, 由于故障后控制策略的调整 4.18s 后直流电流波形逐步稳定, 直流电流基波分量很小, 2 次谐波能达到了 0.45。

3) 由图 8(c) 送端故障特征参数及诊断结果看到, 4.115 s~4.118 s 内送端三相交流电流的特征参数 E_{a1} 为 -1, 满足 $|\max(E_{xy}(n))| > \delta_{21}$ 条件但不满足 $I_{dcy-1}^*(n)/I_{dcy-2}^*(n) > \delta_{22}$ 条件, 送端 F1 故障报警信号

F1-alarm1 一直为 0，直到 4.12s 送端 A 相交流电流有效值 I_{a1}^* 变为 0 满足 $\min(I_{xy}^*(n)) < \delta_3$ 条件，信号 F1-alarm1 跳变为 1 表明送端 A 相出现断线故障，其故障定位需要 20ms，而信号 F2-alarm1 一直为 0。

4) 由图 8(d)受端故障特征参数及诊断结果看到，故障后受端三相交流电流特征 E_{a2} 、 E_{b2} 、 E_{c2} 不满足 $|\max(E_{xy}(n))| > \delta_{21}$ ，故障后受端三相交流电流有效不满足 $\min(I_{xy}^*(n)) < \delta_3$ ，信号 F1-alarm2 为 0，信号 F2-alarm2 也一直为 0。

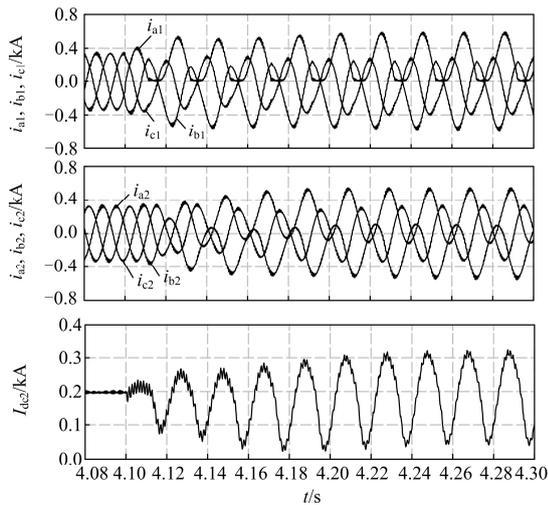
仿真结果和理论分析都表明定位 F1 交流断线故障时需要 20 ms 时间，故障发生时刻不影响故障定位所需时间。

4.2 IGBT 阀开路故障定位仿真及结果分析

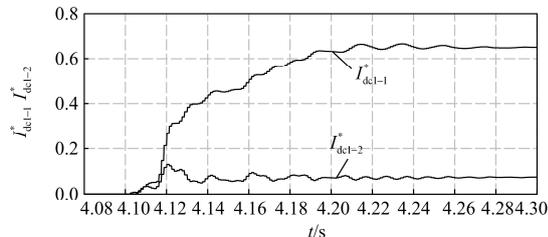
图 9 给出了 F2 的 A 相上桥臂 IGBT 阀 VT₁₁ 故障仿真波形及结果，分析发现：

1) 图 9(a)的两侧交流电流和直流电流波形中，故障后送端 A 相交流电流为正半波，B、C 相电流正弦度较好但也出现直流分量，受端三相交流电流都包含直流分量，直流电流出现了明显基波分量。

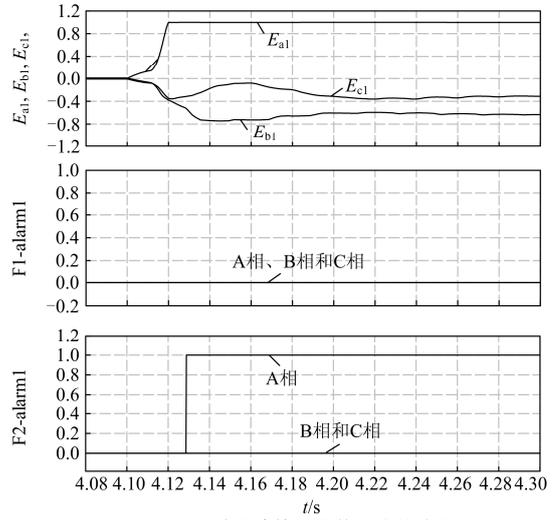
2) 图 9(b)的标么化直流电流谐波分量中，4.14 s 直流电流基波分量达到了 0.4，而 2 次谐波分量幅值相对很小。



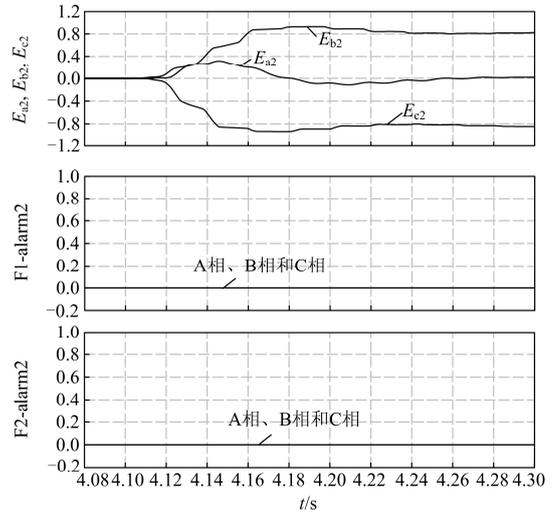
(a) 两侧交流电流及直流电流波形



(b) 标么化直流电流谐波随时间变化曲线



(c) 送端故障特征参数及诊断结果



(d) 受端故障特征参数及诊断结果

图 9 F2 的 IGBT 阀开路故障仿真结果

Fig. 9 F2 IGBT valve open-circuit fault simulation results

3) 图 9(c)送端故障特征参数及诊断结果中，4.12 s 时送端交流电流特征参数 E_{a1} 满足 $|\max(E_{xy}(n))| > \delta_{21}$ 条件，但是直到 4.128 s 才满足 $I_{dcy-1}^*(n)/I_{dcy-2}^*(n) > \delta_{22}$ 条件，此时信号 F2-alarm1 跳变为 1 表明送端 A 相上桥臂 IGBT 阀故障，其定位需要 28ms；而信号 F1-alarm1 依然为 0。

4) 由图(d)受端故障特征参数及诊断结果看到，故障后受端三相交流电流特征参数 E_{a2} 、 E_{b2} 、 E_{c2} 不满足 $|\max(E_{xy}(n))| > \delta_{21}$ ，信号 F2-alarm2 为 0 表明没有出现故障，信号 F1-alarm2 也一直为 0。

理论分析表明只以三相交流电流特征 $E_{xy}(x=a, b, c, y=1, 2)$ 作为诊断特征参数定位 F2 的

IGBT 阀开路故障最多需要 20ms 时间, 考虑到定位故障需要同时满足 $I_{dcy-1}^*(n)/I_{dcy-2}^*(n) > \delta_{22}$ 条件, 故障定位时间会延长, 仿真结果表明利用该算法最多需要 35 ms 能准确定位。

5 结论

(1) 柔性直流输电换流器任一侧换流器的单相断线故障使得直流输电线路电压、电流出现二次谐波波动分量, 直流电压、直流电流的 2 次谐波波动分量与故障侧换流器的 PWM 的调制深度、故障相电流基波幅值成正比例关系。

(2) 柔性直流输电换流器任一侧换流器的单相断线故障使得非故障侧换流器交流电流包含基波负序分量, 其幅值与故障换流器的调制深度、故障相电流直流分量、非故障换流器电流的调制深度成线性关系。

(3) 柔性直流输电换流器故障谐波传递具有规律性, 故障换流器交流侧频率次数为 n 的正序分量在直流侧产生频率次数为 $n-1$ 的谐波分量, 频率为次数为 n 的负序分量在直流侧产生频率次数为 $n+1$ 的谐波分量, 而直流侧频率次数为 $n-1$ 的谐波分量又会导致另一侧非故障换流器交流侧产生频率次数为 $n-2$ 的负序分量和频率次数为 n 的正序分量, 直流侧频率次数为 $n+1$ 的谐波分量使另一侧非故障侧换流器交流侧产生频率次数为 n 的负序分量和频率次数为 $n+2$ 的正序分量。

(4) 以换流器出口直流电流的基波、2 次谐波分量及换流器交流电流有效值和标幺化直流量作为诊断特征变量, 能够在线实时准确的识别轻微故障的故障类型及位置, 诊断时间最多需要 35 ms。

参考文献

- [1] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [2] FLOURENTZOU N, AGELIDIS A G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(4): 592-602.
- [3] 汤广福. 基于电压换流器的高压直流输电技术[M]. 西安: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 汪璐, 邵如平, 王雅璐. 基于海上大型风电场 VSC-HVDC 系统电网侧控制器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 107-112.
WANG Lu, SHAO Ruping, WANG Yalu. Grid side controller design of VSC-HVDC system based on large offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 107-112.
- [5] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [6] 廖武, 黄守道, 黄晟, 等. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统网侧不平衡故障穿越研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 197-203.
LIAO Wu, HUANG Shoudao, HUANG Sheng, et al. Unbalanced grid fault ride-through control method of HVDC power transmission based on modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 197-203.
- [7] 敬华兵, 年晓红, 龚芬. MMC 子模块元件短路故障机理及其新型保护策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 21-27.
JING Huabing, XIAN Xiaohong, GONG Feng. Fault mechanism and novel protection strategy of MMC sub-module component short-circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 21-27.
- [8] 朱韬析, 武诚, 王超. 交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 93-97.
ZHU Taoxi, WU Cheng, WANG Chao. Influence of AC system fault on HVDC system and improvement suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 93-97.
- [9] IEC/PAS 62543: DC transmission using voltage sourced converters[S]. 2008.
- [10] 陈海荣. 交流系统故障时 VSC-HVDC 系统的控制与保护策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
CHEN Hairong. Control and protection of VSC based

- HVDC system under AC system fault conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [11] HANG B, CWIKOWSKI O, BARNES M, et al. Point-to-point two-level converter system faults analysis[C] // The Proceeding of Power Electronics, Machines and Drives, 2014: 1-6.
- [12] 李志雄, 严新平. 独立分量分析和流形学习在 VSC-HVDC 系统故障诊断的应用[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(2): 44-48.
- LI Zhixiong, YAN Xinping. Independent component analysis and manifold learning with applications to fault diagnosis of VSC-HVDC systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(2): 44-48.
- [13] 孙晓云, 同向前, 尹军. VSC-HVDC 系统换流器故障仿真分析及诊断方法的研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1383-1390.
- SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, YIN Jun. Simulation analysis and diagnosis method research on the converter fault in VSC-HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1383-1390.
- [14] 同向前, 伍文俊, 任碧莹. 电压源换流器在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [15] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相 HVDC 站内交流母线故障特性及保护配合[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 6-11.
- YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Internal AC bus fault characteristics of VSC-HVDC System and protection coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 6-11.
- [16] 孙晓云, 同向前, 高鑫. VSC-HVDC 系统中 IGBT 的开路故障特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2541-2549.
- SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, GAO Xin. Analysis of IGBT open-circuit fault characteristic in VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2541-2549.
-
- 收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-05-27
- 作者简介:
- 孙晓云(1977-), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要从事高压直流输电技术方向研究工作; E-mail: xiaoyunsun@sohu.com
- 高鑫(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化的运行管理和研究工作。E-mail: gaox@nw.sgcc.com.cn
- 刘延华(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力设备抽检等方面的工作
- (编辑 张爱琴)