

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191396

柔性直流配电系统换流器交流侧接地故障的分析

周永荣^{1,2}, 秦文康³, 葛佳盛^{1,2}, 孙军^{1,2}, 徐习东³, 董荣森³

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211167; 3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 柔性直流配电网中的换流器若经联结变压器接入交流电网, 联结变与换流阀之间发生绝缘损坏会产生换流器交流侧接地故障。接地故障对系统运行的影响及其保护方案值得研究。首先分析了柔性直流配电网中各部分的共模等效模型。考虑联结变不同的接地方式, 建立了一个典型的五端柔性直流配电系统共模等效电路。推导了各端基频共模电流、电压的计算公式。其次考虑系统可能存在的各种谐振, 提出了一种基于换流器直流侧基频共模电流、电压以及功率方向的多端柔性直流配电系统交流侧接地故障的保护方案。最后在 PSCAD 仿真平台上进行了验证。

关键词: 柔性直流配电; 接地方式; 交流侧接地故障; 共模电流; 共模电压

Analysis of grounding fault on the AC side of converter station in a flexible DC distribution system

ZHOU Yongrong^{1,2}, QIN Wenkang³, GE Jiasheng^{1,2}, SUN Jun^{1,2}, XU Xidong³, DONG Rongsen³

(1. State Grid Electric Power Research Institute Jiangsu Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operational Control, Nanjing 211167, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the flexible DC distribution power system, if the converter station is connected to the AC grid via a connecting transformer, the insulation damage between the connecting transformer and the converter valves will cause a grounded fault on the AC side of the converter station. The influence of this grounded fault and the protection strategy is worth researching. First, the equivalent common-mode circuit model of the components in the flexible DC distribution power system is analyzed. Subsequently, the equivalent common-mode circuit model of a flexible five-terminal DC distribution power system with different grounding methods is built. The calculation formulas of fault fundamental frequency common-mode current and voltage after a converter AC side single-phase grounded fault occurs are obtained. Then, considering various resonances that may exist in a DC system, a protection strategy based on a converter DC side fundamental frequency common-mode voltage, current and power direction to identify the single-phase grounded fault on the converter AC side is proposed and verified on the PSCAD platform.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100).

Key words: flexible DC distribution power system; grounding method; AC side single-phase grounded fault; common-mode current; common-mode voltage

0 引言

柔性直流配电系统中接地方式为整个柔性直流配电系统提供参考电位^[1-4], 不同的接地形式会导致不同的接地故障特征^[5-6], 从而影响继电保护的选

取与整定。

柔性直流配电系统的接地参考电位可以选取在换流器交流侧或直流侧。如果选取在换流器交流侧, 此时联结变压器采用 Δ/Yn 接线方式, 或在 Yn/Δ 接线方式的基础上在二次侧增设人造中性点进行有效接地^[7-8], 此时直流侧不接地; 如果选取在换流器直流侧, 此时联结变压器采用 Yn/Δ 接线方式, 换流器

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2017YFB0903100)

直流侧通过直流侧电容中点直接接地或高阻接地^[9]。

换流器交流侧接地故障中的零序电压分量会引起直流侧正负极电压的基频共模波动^[10]。文献[11]分析了柔性直流零序三次谐波的传播过程,但是没有分析交流侧接地故障下零序基频分量的传播过程;文献[12]分析了换流器交流侧接地故障时直流侧不同接地方式下换流器直流侧电容中点电位出现基频波动的问题,但没有对整个直流电网的基频波动问题展开讨论;文献[13]对换流器交流侧接地故障下换流器直流侧正负极电容电压的响应进行了推导,但是没有考虑非故障端对故障端故障量的影响;文献[14]提及了直流侧基频共模电压问题,但没有分析基频共模分量对直流电网及非故障端的影响。

已有一些文献对柔性直流接地故障保护进行了研究。文献[15-16]探讨了柔性直流系统换流器直流侧的接地故障,但这些并不适用于换流器交流侧接地故障的判断。文献[17]提出了换流器交流侧接地故障的接地选择方案,但是未提出明确的故障保护方案。

本文根据柔性直流配电系统各组成部分的工作原理及接地方式,建立了与之对应的零序共模等效电路模型,推导了不同接地方式下换流器交流侧接地故障基频共模电流、电压的计算方法,最终提出了一种基于基频共模电压、电流以及功率方向识别的多端柔性直流配电系统换流器交流侧接地故障的保护方案,用于识别与隔离故障端,避免一端接地引起整个系统停运。

1 柔性直流配电系统组成及其共模等效模型

柔性直流配电系统通常由联结变压器、AC/DC换流站、直流变压器、直流线路、交直流负荷等部分组成^[18-19],图1为一个典型的五端柔性直流配电系统拓扑结构示意图,两端换流站均为VSC结构,主接线方式采用两电平结构,采用空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术控制上下桥臂阀开关^[20],系统正常运行时,换流站1采用定电压控制方式,换流站2采用定直流功率控制方式。各元件共模等效模型如下。

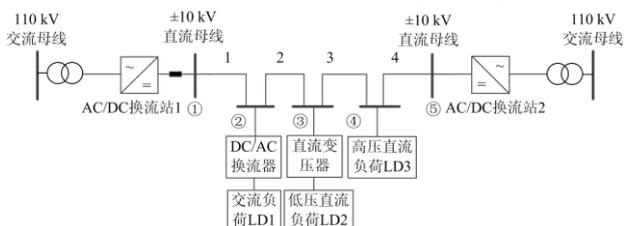


图1 五端柔性直流配电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of five-terminal flexible DC power distribution system

1.1 联结变压器

联结变压器^[21]一次侧连接交流系统,二次侧连接AC/DC换流器,把交流系统电压变换到换流器所需的换相电压,它的接线方式决定了换流器交流侧的接地方式。 Δ/Y_n 接线方式下换流器交流侧存在接地点, Y_n/Δ 接线方式下换流器交流侧不存在接地点。在共模等效电路中,可采用阻抗 Z_{gdj} 代表第 j 端联结变压器二次侧的接地阻抗, $Z_{gdj} = \infty$ 代表换流器交流侧不接地, $Z_{gdj} = 0$ 代表换流器交流侧直接接地,共模等效模型如图2所示。

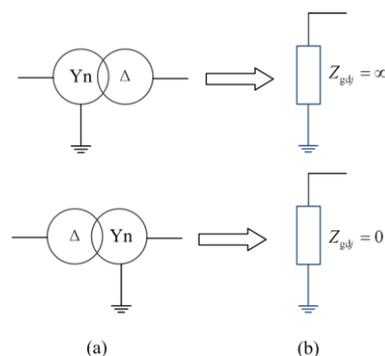


图2 联结变压器共模等效模型

Fig. 2 Common-mode equivalent model of joint transformer

1.2 AC/DC换流器

AC/DC换流器^[22]采用脉宽调制技术控制上下桥臂阀开关,实现交直流的相互转换,如图3(a)所示。采用电阻 R_{gj} 代表第 j 端换流器直流侧电容中性点接地电阻, $R_{gj} = 0$ 代表直流侧电容中性点直接接地, $R_{gj} \neq 0$ 代表直流侧电容中性点经阻抗接地, $R_{gj} = \infty$ 代表直流侧电容中性点不接地。对AC/DC换流器进行零序等效,换流站的电力电子开关元件可等效为含开关频率次高频分量的电压源 U_{vsc_j} ^[10],换流器的直流电容 C_j 与接地电阻 R_{gj} 可以等效成共模电容 $2C_j$ 与电阻 R_{gj} 的串联,如图3所示。

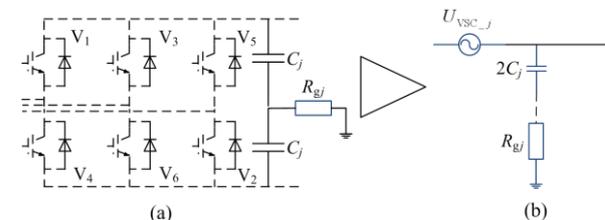


图3 AC/DC换流站共模等效模型

Fig. 3 Common-mode equivalent model of AC/DC converter station

1.3 直流变压器

直流变压器^[23]通过高频交流变压器隔离技术,可以实现直流电压等级的转换,从而实现低压直流负荷与直流母线的连接。直流变压器有隔离作用,电源侧的共模量不能传递到直流负荷侧,对共模电路的影响仅与直流电容的接地方式有关。图 4(a)为采用全桥结构的直流变压器典型拓扑^[24],零序等效电路如图 4(b)所示。

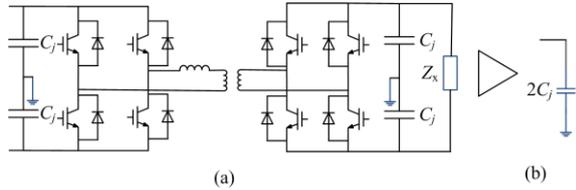


图 4 直流变压器零序等效模型

Fig. 4 Common-mode equivalent model of DC transformer

1.4 直流线路

直流线路的集中参数等效 π 型电路^[25]如图 5(a)所示,第 i 条单条线路的阻抗用 $2Z_{li}$ 表示,对地电容用 C_{0i} 表示,其零序共模等效模型如图 5(b)所示。

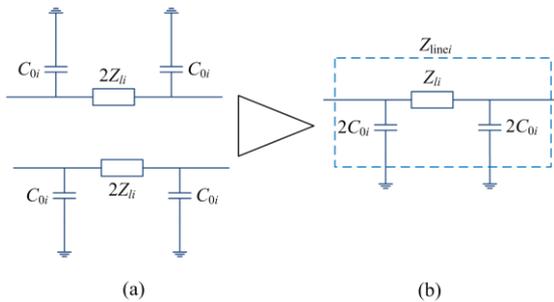


图 5 直流线路零序等效模型

Fig. 5 Common-mode equivalent model of DC lines

2 不同接地方式下柔性直流配电系统共模故障量计算

AC/DC 换流站交流侧发生单点接地故障时,根

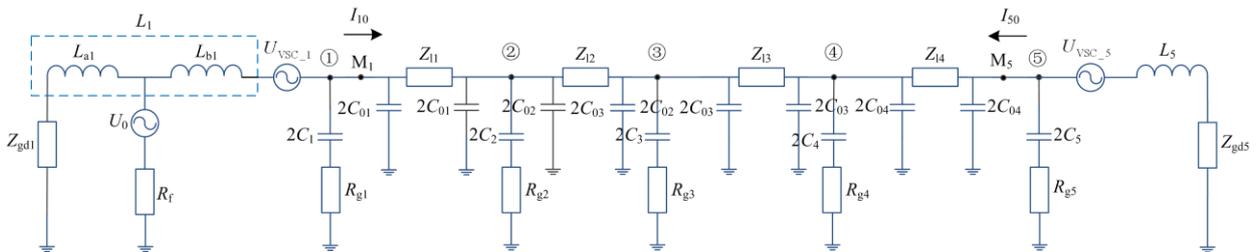


图 8 柔性直流配电网零序等效模型

Fig. 8 Common-mode equivalent model of flexible DC distribution network

发生 1 端换流器交流侧接地故障时,故障点产生的零序电压 U_0 其基波分量远大于谐波分量,

据故障点位置的不同,故障可以分为换流电抗器交流侧故障(k_1 点)、换流电抗器阀侧故障(k_2 点),如图 6 所示。

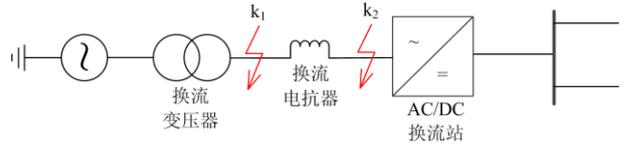


图 6 故障点位置

Fig. 6 Fault point position

选用 L_1 、 L_5 代表图 1 中 1 端与 5 端的共模等效换流电感,用 R_f 代表过渡电阻,在共模等效电路中,故障位置问题可以转换成故障点左右两侧共模等效换流电感值的问题。以第 j 端换流站交流侧单点接地故障为例,选用电感 L_{aj} 、 L_{bj} 来代表故障点左右两侧的共模等效换流电感值,当 $L_{aj} = 0$ 、 $L_{bj} = L_1$ 时,说明故障发生在 1 端换流电抗器交流侧,当 $L_{aj} = 1$ 、 $L_{bj} = 0$ 时,说明故障发生在 1 端换流电抗器阀侧,如图 7 所示。

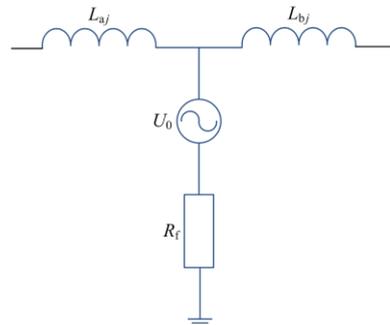


图 7 故障点位置等效模型

Fig. 7 Equivalent model of fault point position

图 1 所示五端柔性直流配电系统在 1 端换流器交流侧故障时,系统共模等效电路如图 8 所示,其中 M_1 、 M_5 分别为换流器出口处保护安装位置。

也大于换流器产生的纵向高次谐波分量,故忽略换流站所产生的纵向高次谐波分量,即 $U_{VSC_j} =$

0($j=1,5$)。此时 M_5 点观测到的阻抗为 5 端换流器与联结变压器构成的基频共模等效阻抗, M_1 点观测到阻抗为 M_1 右侧电路构成的基频共模等效阻抗, 若记图 8 中①—⑤节点右侧阻抗为基频共模阻抗 $Z_j(j=1,2,3,4,5)$, ω 为基频角频率, 其值如式(1)、式(2)所示。

$$Z_5 = j\omega L_5 + Z_{gd5} \quad (1)$$

$$Z_j = \left(Z_{ij} + \frac{1}{j2\omega C_{0j}} // Z_{j+1} // Z_{(j+1)0} \right) // \frac{1}{j2\omega C_{0j}} \quad (2)$$

$(j=1,2,3,4)$

其中, $Z_{j0}(j=1,2,3,4,5)$ 为各节点设备基频共模等效阻抗, $\omega=100\pi$ rad/s, 其值为

$$Z_{j0} = \frac{1}{j2\omega C_j} + R_{gj} \quad (3)$$

其中, $R_{gj}(j=1,2,3,4,5)$ 为各端直流电容中性点接地阻抗。

若记 $Z'_1 = \frac{Z_1 Z_{10}}{Z_1 + Z_{10}}$, 由故障点测得的零序回路

基频总阻抗 Z 为

$$Z = R_f + (Z_{gd1} + j\omega L_a) // (j\omega L_b + Z'_1) \quad (4)$$

接地故障零序基频电流 I_0 为

$$I_0 = U_0 / Z \quad (5)$$

式中, $U_0 = (U_a + U_b + U_c) / 3$ 。

M_1 点基频共模电压为

$$U_{10} = U_0 \frac{(Z_{gd1} + j\omega L_a) // (j\omega L_b + Z'_1)}{R_f + (Z_{gd1} + j\omega L_a) // (j\omega L_b + Z'_1)} \cdot \frac{Z'_1}{Z'_1 + j\omega L_b} \quad (6)$$

若记 $Z'_j = \frac{Z_j Z_{j0}}{Z_j + Z_{j0}} // \frac{1}{j2\omega C_{0(j-1)}} (j=2,3,4,5)$, Z'_j

为 j 节点右侧网络和 j 节点对地电容并联构成的基频对地综合阻抗, 其余端口基频共模电压可表示为

$$U_{j0} = U_{(j-1)0} \frac{Z'_j}{Z'_j + Z_{1j-1}} (j=2,3,4,5) \quad (7)$$

由式(4)可知, 零序回路基频阻抗 Z 与系统接地方式和故障点位置相关。若联结变压器二次侧直接接地, Z_{gdj} 为变压器的零序基频短路电抗, Z 将取决于换流电感和短路过渡电阻, 这种情况通常会在变压器上产生一个很大的接地故障短路电流, 通常可采用联结变压器二次侧的过流保护来识别这种接地故障, 若要提高保护的灵敏性也可采用文献[17]所提出的差动保护。

若联结变压器二次侧不接地, Z_{gdj} 为 ∞ , Z 仅与直流网络相关, 故障点右侧是换流电感与其余直流网络的串联阻抗, 由于右侧直流网络存在大量电感、

电容, 可能会发生各种类型的基频谐振, 若发生换流电感参与的串联谐振, 故障基频共模电流很大, 流过 M_1 处的基频共模电流 I_{10} 很大, 但故障点基频共模电压很低, 相反 M_1 处基频共模电压 U_{10} 很高甚至会超过零序基频故障电源 U_0 , 此时故障端联结变压器没有故障电流, 非故障端零序基频电压受 M_1 处基频共模电压影响, 可能超出故障侧的 U_{10} , 因此仅凭联结变压器二次侧的零序基频电流、电压无法区分故障端。

若线路 l_1 的阻抗 Z_{l1} 与节点 2 的综合阻抗 Z'_2 之间发生串联谐振, 则 $Z_1 = 0$, 由式(7)可知, 此时 M_1 处基频共模电压 $U_{10} = 0$, 但是流过 M_1 处的基频共模电流 I_{10} 会很大, M_5 处基频共模电压可能会超出 M_1 处基频共模电压, 即非故障端基频共模电压超过故障端。

若节点 2 处对地基频共模电容 Z_{20} 、线路 l_1 近节点 2 端对地等效基频共模电容 $2C_{01}$ 与节点 2 右侧基频共模阻抗 Z_2 之间发生并联谐振, 则 $Z_1 = \infty$, 此时流过 M_1 处的基频共模电流 I_{10} 为 0, M_5 处基频共模电流可能会超出 M_1 处基频共模电流, 即非故障端基频共模电流超过故障端。

3 故障端识别与保护

在柔性直流配电系统中, 若联结变压器二次侧中性点不接地时, 当一端换流器交流侧发生接地故障时, 并不一定会产生很大的故障电流, 若及时切除或闭锁故障端, 可以避免整个系统停运, 提高系统可靠性。一端换流器交流侧发生接地故障时会导致其他端口出现基频共模电流、电压, 且其他端基频共模电流、电压可能会高于故障端, 并不能单纯地通过本侧基频共模电流、电压来判断本侧发生故障。本文针对联结变压器二次侧不直接接地的柔性直流配电系统, 提出了一个基于基频共模稳态量的换流器交流侧接地故障诊断方案, 通过测量换流器直流侧的基频共模电压、基频共模电流来判断该换流器交流侧是否发生接地故障, 判据如图 9 所示。其中, U_{j0} 、 I_{j0} 、 $2C_j$ 分别为第 j 端换流器直流侧出口处基频共模电压、基频共模电流和直流共模电容, k_1 为过电量可靠系数, ε_1 为基频共模电流测量可能出现的最大误差, ε_2 为基频共模电压测量可能出现的最大误差, k_2 为欠电量可靠系数。

正常运行时, 系统中基频共模电压、电流都很小, 保护不会误动作。当一端换流器发生交流侧接地故障时, 全系统都会出现基频共模电压或基频共模电流, 非故障端的基频共模电压、电流之间存在一个固定的关系, 如式(8)所示, 且非故障端基频有

功共模功率方向是由母线指向非故障端设备。

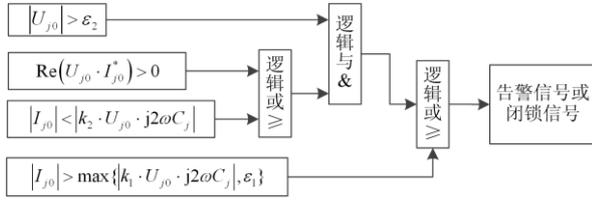


图 9 接地故障保护逻辑

Fig. 9 Fault detection protection strategy

$$|I_{j0}| = |U_{j0} \cdot j2\omega C_j| \quad (8)$$

故障端基频共模电压、基频共模电流的关系和系统其他部分的基频等效共模阻抗相关，其基频共模功率方向是由故障端指向母线，因此通过基频共模功率方向是可以判断出故障端的，即通过 $\text{Re}(U_{j0} \cdot I_{j0}^*)$ 的正负来判断故障端与非故障端。

但是系统发生谐振时，会导致系统基频共模电流或基频共模电压极低，此时会降低方向元件的灵敏度，需要增加基频共模电流、基频共模电压的辅助判据。当系统发生串联谐振时，故障端的基频共模电压 U_{j0} 可能会很小，但是故障端基频共模电流会很大，非故障端满足式 (8)，可以通过 $|I_{j0}| > |k_1 \cdot U_{j0} \cdot j2\omega C_j|$ 的判据来判断故障；当系统发生并联谐振时，故障端的基频共模电压 U_{j0} 会很大，但基频共模电流 I_{j0} 可能会很小，此时可以通过 $|U_{j0}| > \varepsilon_2$ 、 $|I_{j0}| < |k_2 \cdot U_{j0} \cdot j2\omega C_j|$ 的综合判据来判断故障。

4 仿真验证

以图 1 所示的五端柔性直流配电系统拓扑为基础，建立 PSCAD 仿真模型， $k_1 = 1.3$ ， $k_2 = 0.8$ ， $\varepsilon_1 = 10\%I_{dc} = 50 \text{ A}$ ， $\varepsilon_2 = 5\%U_{dc} = 1000 \text{ V}$ ，仿真系统详细参数见表 1。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of simulation system

参数	数值
系统电压/kV	110
联结变变比	110/10
直流侧额定电压 U_{dc} /kV	20
直流侧额定电流 I_{dc} /kA	0.5
1、5 端换流电感/mH	5.6
1-5 端直流电容/ μF	2 000

4.1 系统无谐振发生时

以 1 端换流站发生故障为例，设定 0.4 s 时 1 端换流器交流侧发生 A 相永久接地故障， M_1 、 M_5 处共模电压、共模电流如图 10 所示。

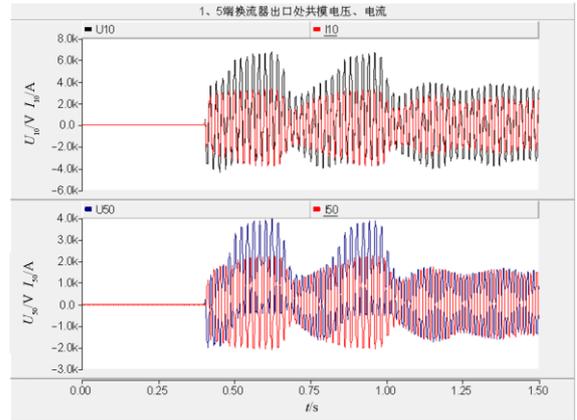


图 10 交流侧接地故障 M_1 、 M_5 点共模电压、电流
Fig. 10 Common-mode voltage and current of M_1 , M_5 when AC side grounded fault occurs

结果如表 2 所示。

表 2 无谐振时故障前后 1、5 端基频共模电压、电流、功率方向

Table 2 Fundamental frequency common mode voltages, currents, and power directions of terminal 1, 5 before and after the fault without resonance

	U_{10}	I_{10}	$\text{RE}(U_{10}, I_{10})$	U_{50}	I_{50}	$\text{RE}(U_{50}, I_{50})$
故障前	0	0	-	0	0	-
故障后	2 297.3 V	1 584.3 A	+	976.5 V	998.8 A	-

故障之前各端基频共模电压、基频共模电流都为 0，任何一端都不会发出故障接地信号。

故障之后 $|U_{10}| = 2 297.3 \text{ V}$ 、 $|I_{10}| = 1 584.3 \text{ A}$ ， $\text{Re}(U_{10} \cdot I_{10}^*) > 0$ ，因此根据基频共模功率方向可以判断 1 端发生接地故障。 $|U_{50}| = 976.5 \text{ V}$ 、 $|I_{50}| = 998.8 \text{ A}$ 、 $\text{Re}(U_{50} \cdot I_{50}^*) < 0$ ，根据基频共模功率方向判断 5 端没有发生接地故障。 $|U_{50} \cdot j2\omega C_5| = 1 127.1 \text{ V}$ ， I_{50} 与 U_{50} 不满足式(8)，这是因为测量的过程中存在误差，此时 $|I_{50}| < |k_1 U_{50} \cdot j2\omega C_5|$ 且 $|I_{50}| > |k_2 U_{50} \cdot j2\omega C_5|$ ，结合前面的基频共模功率方向判据，可以判断 5 端没有发生接地故障。

4.2 系统出现串联谐振时

当 Z_{11} 与 Z'_2 之间发生串联谐振时， M_1 、 M_5 处共模电压、共模电流仿真结果如图 11 所示。

结果如表 3 所示。

故障端基频共模电压 $|U_{10}| = 495.0 \text{ V}$ ，非故障端基频共模电压 $|U_{50}| = 1 792.8 \text{ V}$ ，显然，非故障端基

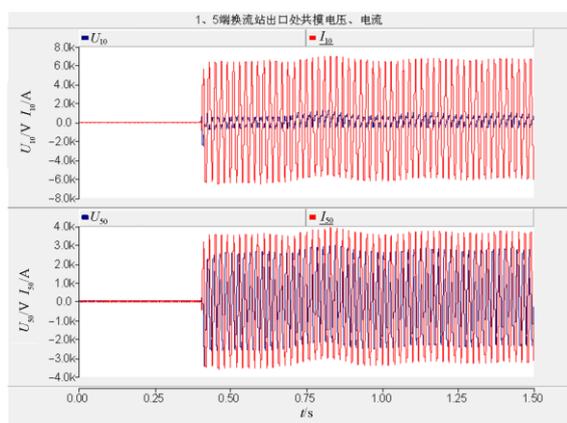
图 11 串联谐振时 M_1 、 M_5 处共模电压、电流Fig. 11 Common-mode voltage and current of M_1 , M_5 when series resonance occurs

表 3 串联谐振时故障前后 1、5 端基频共模电压、电流、功率方向

Table 3 Fundamental frequency common mode voltages, currents, and power directions of terminal 1, 5 before and after the fault in series resonance

	U_{10}	I_{10}	$\text{RE}(U_{10}, I_{10})$	U_{50}	I_{50}	$\text{RE}(U_{50}, I_{50})$
故障前	0	0	—	0	0	—
故障后	495.0 V	4 441.7 A	+	1 798.2 V	2 432.1 A	—

频共模电压超过故障端。虽然故障后 1 端的基频共模功率方向大于 0，理论上可以判断出该端是故障端，考虑故障端电压很小，为 $2.5\%U_{dc}$ ，方向元件可能会有灵敏度的问题。此时， $|U_{10} \cdot j2\omega C_1| = 622.0 \text{ A}$ ，根据 $|I_{10}| > |k_1 U_{10} \cdot j2\omega C_1|$ 可以判断 1 端发生接地故障。非故障端 $|U_{50}| = 1792.8 \text{ V}$ 、 $|I_{50}| = 2432.1 \text{ A}$ 、 $\text{Re}(U_{50} \cdot I_{50}^*) < 0$ ，功率方向判据指示 5 端没有发生接地故障， $|U_{50} \cdot j2\omega C_5| = 2252.9 \text{ A}$ ， $0.8 \cdot 2252.9 < |I_{50}| < 1.3 \cdot 2252.9$ ，基频共模电流、电压的辅助判据同样判断 5 端没有发生故障。

4.3 系统出现并联谐振时

当 Z_{20} 与 Z_2 之间发生并联谐振时， M_1 、 M_5 处共模电压、共模电流如图 12 所示。

结果如表 4 所示。

故障端基频共模电流 $|I_{10}| = 141.4 \text{ A}$ ，为直流侧额定电流 I_{dc} 的 28%，非故障端基频共模电流 $|I_{50}| = 6671.2 \text{ A}$ ，显然，非故障端基频共模电流超过故障端基频共模电流，此时， $|U_{10}| = 5832.9 \text{ V}$ ， $\text{Re}(U_{10} \cdot I_{10}^*) > 0$ ，根据基频共模功率方向可以判断

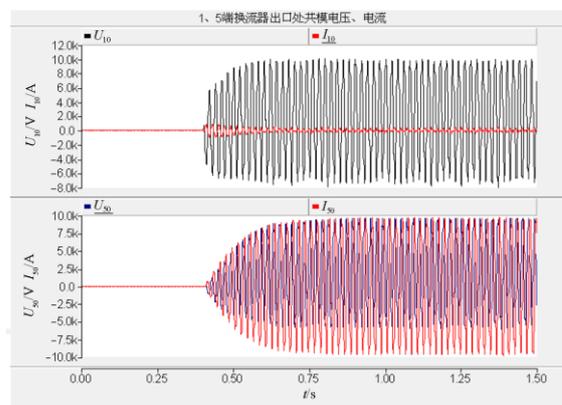
图 12 并联谐振时 M_1 、 M_5 处共模电压、电流Fig. 12 Common-mode voltage and current of M_1 , M_5 when parallel resonance occurs

表 4 并联谐振时故障前后 1、5 端基频共模电压、电流、功率方向

Table 4 Fundamental frequency common mode voltages, currents, and power directions of terminal 1, 5 before and after the fault in parallel resonance

	U_{10}	I_{10}	$\text{RE}(U_{10}, I_{10})$	U_{50}	I_{50}	$\text{RE}(U_{50}, I_{50})$
故障前	0	0	—	0	0	—
故障后	5 832.9 V	141.4 A	+	5 321.8 V	6 671.2 A	—

1 端发生接地故障。 $|U_{10} \cdot j2\omega C_1| = 7329.8 \text{ A}$ ，根据 $|U_{10}| > 1000 \text{ V}$ 和 $|I_{10}| < 0.8 \cdot 7329.8 \text{ A}$ 判据也可以判断 1 端发生接地故障。非故障端 $|U_{50}| = 5321.8 \text{ V}$ 、 $|I_{50}| = 6671.2 \text{ A}$ 、 $\text{Re}(U_{50} \cdot I_{50}^*) < 0$ ，基频共模功率方向判据指示 5 端没有发生接地故障， $|U_{50} \cdot j2\omega C_5| = 6687.6 \text{ A}$ ， $0.8 \cdot 6687.6 < |I_{50}| < 1.3 \cdot 6687.6$ ，基频共模电流电压的辅助判据同样判断 5 端没有发生故障。

5 结语

本文建立了适用于不同接地方式的柔性直流配电系统的共模等效电路，推导了换流器交流侧接地故障时基频共模电流、电压的计算方法，提出了一种基于基频共模量识别的多端柔性直流配电系统换流器交流侧接地故障的保护方案，得出以下结论：

1) 柔性直流配电系统通常经过联结变压器隔离接入交流网络，联结变压器二次侧中性点不直接接地时该侧发生接地故障不会有很大的接地故障短路电流，该侧零序基频电压与直流网络相关，零序基频电压值可能会小于其他端联结变压器二次侧零序基频电压，因此联结变压器二次侧零序基频电流、

电压保护不能识别接地故障是否发生在本端。

2) 若联结变压器二次侧不接地, 联结变压器二次侧发生接地故障时, 整个直流系统都会出现基频共模电流、电压。非故障端测量的基频共模阻抗与该端接地基频共模等效阻抗有关, 故障端的 AC/CD 直流侧测得的基频共模阻抗与整个直流网络基频共模等效阻抗相关。由于直流网络中存在大量的电感电容, 可能会发生各种类型的基频谐振。某些串联谐振可能会导致故障端基频共模电压很小, 低于非故障端的基频共模电压; 某些并联谐振可能会导致故障端基频共模电流很小, 低于非故障端的基频共模电流, 故障端基频共模电流小意味着即使故障端采用差动保护也会出现灵敏度低的情况。

3) 因各种基频谐振的存在导致单一的基频共模电流、共模电压难以识别故障端, 但是可以根据故障发生时的基频共模电流、电压的功率方向来识别故障端, 考虑各类基频谐振时基频共模电流、基频共模电压很小会导致方向元件不灵敏, 可以利用谐振时基频共模电流异常偏小或者异常偏大的情况来识别故障端。识别故障端后可以通过闭锁或者切除接地端, 来确保网络的其他部分运行, 提高系统的运行可靠性。

致谢

感谢智能电网保护与运行控制国家重点实验室对本项目的资助。

参考文献

- [1] MOHAMMADI J, AJAEI FB, STEVENS G. Grounding the DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 4490-4499.
- [2] DRAGIČEVIĆ T, LU X, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids — part II: a review of power architectures, applications, and standardization issues[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3528-3549.
- [3] 李祝昆, 朱益华, 徐海波, 等. 适应安全稳定控制的双端柔性直流输电系统故障闭锁判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 145-155.
LI Zhukun, ZHU Yihua, XU Haibo, et al. Research on fault blocking criteria of two-terminal VSC-HVDC transmission system adapting to safety and stability control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 145-155.
- [4] 董荣森, 汤晓晨, 徐习东. 柔性直流配电网接地方式对故障特性的影响分析[J]. 能源工程, 2019(2): 8-16.
DONG Rongsen, TANG Xiaochen, XU Xidong. Effects of grounding mode on fault characteristics in flexible DC distribution system[J]. Energy Engineering, 2019(2): 8-16.
- [5] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [6] 孙栩, 曹士冬, 雷霄, 等. ± 500 kV 柔性直流电网控制策略研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 154-160.
SUN Xu, CAO Shidong, LEI Xiao, et al. Control strategy research on ± 500 kV flexible HVDC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 154-160.
- [7] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 58-62.
LI Fuzhong, ZHOU Min, HE Yanzhi, et al. Design scheme of system access and converter station of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 58-62.
- [8] 吴方劫, 马玉龙, 梅念, 等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2651-2657.
WU Fangjie, MA Yulong, MEI Nian, et al. Design of main connection scheme for Zhoushan flexible multi-terminal HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2651-2657.
- [9] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2551-2561.
WU Jun, WU Di, ZHU Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2551-2561.
- [10] 管敏渊, 徐政. 两电平 VSC-HVDC 系统直流侧接地方式选择[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 55-60.
GUAN Minyuan, XU Zheng. DC side grounding methodology for a two-level VSC HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 55-60.
- [11] 梅念, 陈东, 吴方劫, 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.
- [12] 杨杰, 郑健超, 汤广福, 等. 电压源换相高压直流输电系统接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 14-19.
YANG Jie, ZHENG Jianchao, TANG Guangfu, et al. Grounding design analysis of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 14-19.
- [13] 高一波, 徐习东, 金阳忻, 等. 交流侧接地故障对直流配电网电压平衡影响[J]. 电网技术, 2014, 38(10):

- 2665-2670.
GAO Yibo, XU Xidong, JIN Yangxin, et al. Impact on the voltage balancing of DC distribution network under AC side grounding fault[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2665-2670.
- [14] 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(7): 2353-2364.
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(7): 2353-2364.
- [15] 汪楠楠, 姜崇学, 王佳成, 等. 采用直流断路器的对称单极多端柔性直流故障清除策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 122-130.
WANG Nannan, JIANG Chongxue, WANG Jiacheng, et al. Fault elimination strategy of symmetric single-pole VSC-MTDC based on DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 122-130.
- [16] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48.
- [17] 王赞, 方乙君, 梅念, 等. 柔性直流换流站直流接地点选择探讨[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 212-217.
WANG Zan, FANG Yijun, MEI Nian, et al. Discussion on selection of DC grounding point for flexible DC converter station[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 212-217.
- [18] 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.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [19] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-44.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44.
- [20] MOYNIHAN J F, EGAN M G, MURPHY J M D. Theoretical spectra of space-vector-modulated waveforms[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1998, 145(1): 17-24.
- [21] GUAN M, CHENG J, WANG C, et al. The frequency regulation scheme of interconnected grids with VSC-HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(2): 864-872.
- [22] GUO W, HAN X, REN C, et al. The control method of bidirectional AC/DC converter with unbalanced voltage in hybrid micro-grid[C] // 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), June 15-17, 2015, Auckland, New Zealand: 381-386.
- [23] WAI R J, CHEN B H. High-efficiency dual-input interleaved DC-DC converter for reversible power sources[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 2903-2921.
- [24] 赵亚雄. 基于直流配电网的直流变压器拓扑及其控制方法的研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
ZHAO Yaxiong. Research on DC transformer topology and its control method based on DC distribution network[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [25] 鲍乐, 丛伟, 胡妹, 等. 基于同步采样值的输电线路参数非解耦算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 23-28.
BAO Le, CONG Wei, HU Mei, et al. Transmission line parameters coupling algorithm based on synchronous sampling signal[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(5): 23-28.

收稿日期: 2019-11-07; 修回日期: 2020-02-11

作者简介:

周永荣(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: zhouyongrong@sgepri.sgcc.com.cn

秦文康(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: qwk1532@126.com

葛佳盛(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 葛艳娜)