

混合 MIDC 馈入下的工频变化量阻抗方向保护 动作特性分析

徐岩, 刘泽锴, 应璐曼

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 交流电网故障引发线路换相换流器高压直流(Line Commutated Converter High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)换相失败, 改变了原有交流电网工频变化量方向保护动作特性。针对这一问题, 建立了由电压源换流器高压直流(Voltage Source Converter HVDC, VSC-HVDC)系统与 LCC-HVDC 系统组成的混合多馈入直流(hybrid multi-infeed HVDC, HMIDC)输电系统模型, 并与馈入同一交流电网的单条 LCC-HVDC 的交直流系统进行对比分析。结合分析工频变化量方向保护原理的特点, 定量分析了在两种不同输电结构, 同一换相失败情况下的等值工频变化量阻抗特性。基于 PSCAD/EMTDC 对两种不同结构的直流输电系统, 以同一故障引发换相失败进行仿真分析, 验证了理论分析的准确性和有效性。表明该 HMIDC 系统能改善 LCC-HVDC 换相失败对工频变化量方向保护的影响; 理论分析方法为电网直流规划提供了评估依据。

关键词: 线路换相换流器高压直流; 电压源换流器高压直流; 混合多馈入直流; 工频变化量; 方向纵联保护; 换相失败

Performance of impedance directional protection based on variation of power-frequency components in hybrid multi-infeed HVDC system

XU Yan, LIU Zekai, YIN Luman

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: The LCC-HVDC commutation failure caused by AC power network fault affects the operation of directional protection based on power-frequency component variation for AC transmission lines. A hybrid multi-infeed HVDC system model consisted of a VSC-HVDC system and a LCC-HVDC system is set up, compared with a AC/DC system of a single LCC-HVDC system fed into the same AC grid. Combined with the characteristic of the analysis of power-frequency component variation based on the principle of directional protection, the performance of LCC-HVDC equivalent impedance of power-frequency component variation is quantitatively analyzed under the same commutation failure in LCC-HVDC system of this two different transmission structures. The simulations of two different structures for the same commutation failure of HVDC in identical fault simulated by PSCAD/EMTDC testify the accuracy and validity of the theory analysis. It indicates that the hybrid multi-infeed HVDC system can improve the impact of directional protection based on power-frequency component variation caused by the LCC-HVDC commutation failure and provides the theoretical basis for the power network planning.

Key words: line commutated converter high voltage direct current; voltage source converter HVDC; hybrid multi-infeed HVDC; power-frequency component variation; directional pilot protection; commutation failure

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0014-07

0 引言

随着线路换相换流器高压直流(Line Commutated Converter High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)输电在我国电网的广泛应用, 纯交流电网运行环境

发生了改变。LCC-HVDC 在交流电网故障时发生换相失败, 使交流系统的单一故障具有复故障的特点, 产生许多新的电气特征, 对交流电网继电保护的运行产生不利的影响^[1-2]。迄今为止, 直流换相失败已引起多起交流电网继电保护误动作事故^[3]。

近年来电压源换流器高压直流(Voltage Source Converter HVDC, VSC-HVDC)输电技术得到了长足的发展,被广泛应用于海上风电场的并网^[4]、灵活的多端直流输电^[5]。综合利用 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的优点,是当前研究的热点^[6]。为了增强 MIDC 输电系统稳定性,减少换相失败,文献[7-8]将 VSC-HVDC 引入到传统直流输电系统中,研究其稳态和暂态特性,但现有文献未见在这种新型混合多馈入直流(Hybrid Multi-infeed HVDC, HMIDC)系统在 LCC-HVDC 换相失败时,对交流电网继电保护动作特性做相关研究。

工频变化量方向继电器因其判据简单,动作速度快,方向性明确,没有死区,不反应系统振荡,抗过渡电阻能力强等优点,在国内纵联保护中广泛应用^[9]。文献[10]在单馈入 LCC-HVDC 输电系统其换相失败时,对交直流混联电网工频变化量阻抗进行了定量分析,仿真给出了保护安装处电气量特征的变化。本文建立了适用于研究 HMIDC 馈入下的交直流电网工频变化量动作特性模型,基于工频变化量方向保护原理,定量分析了该模型换相失败时等值阻抗运行特性,并与馈入同一交流电网的单馈入 LCC-HVDC 标准测试模型进行对比分析,最后在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下对上述两种结构进行理论验证。结果表明,阻抗定量计算方法为高压直流规划提供了理论依据,HMIDC 系统能改善原有 LCC-HVDC 换相失败对工频变化量方向保护的影响,为消除传统 MIDC 的交直流混联运行给大电网中继电保护带来的安全隐患提供了一种新思路。

1 HMIDC 系统的交直流混联故障分析模型

1.1 HMIDC 系统的交直流混联故障特性

对于交直流混联系统,直流逆变站对交流电网故障相当敏感。交流系统故障极易引发 LCC-HVDC 逆变站发生换相失败^[11]。LCC-HVDC 控制系统的快速响应,使原本的单一故障呈现出复故障的特征;VSC-HVDC 可以实现有功功率、无功功率同时且相互独立、快速的调节,动态补偿所联系统的无功功率,稳定馈入交流母线的电压,起到静止补偿器(Static Compensators, STATCOM)的作用^[7]。直流系统换相失败主要对故障线路靠近直流系统侧的工频变化量方向元件产生影响^[12]。因此,本文仅分析 HMIDC 系统中 LCC-HVDC 馈入系统的交流线路故障,并引发换相失败,靠近其逆变侧交流线路方向保护的動作情况。此时,系统中将会同时存在三个故障附加电源:一是故障点的故障附加电源;二是 LCC-HVDC 逆变器换相失败后控制系统快速调节

产生的附加电源;三是 VSC-HVDC 快速调节产生的附加电源。继电保护的動作行为将由以上三个故障分量电源相互“竞争”,给 LCC-HVDC 逆变侧交流电网继电保护能否正确動作带来了不确定性。

1.2 HMIDC 系统的交直流混联故障数学模型

HMIDC 的交直流混联系统模型如图 1 所示。因 LCC-HVDC 馈入端通常都是区域电网的负荷中心,因此逆变侧通常采用全补偿方式。该系统模型正常运行时,VSC-HVDC 无需提供无功电流,两条直流各自独立运行,向受端交流系统输送电能。当 f 点发生故障并引发 LCC-HVDC 逆变站发生换相失败,保护安装处的电气量可以表示成

$$E_{\varphi} = F_{AC}(-\dot{U}_{\varphi}) + F_{IDC}(\dot{I}_{dc1,eq\varphi}) + F_{2DC}(\dot{I}_{dc2,eq\varphi})$$

式中: $\varphi = a, b, c$ 分别表示 a、b、c 相; E_{φ} 为 φ 相保护装置所用的电气量; $-\dot{U}_{\varphi}$ 为交流电网故障点电压源; $\dot{I}_{dc1,eq\varphi}$ 、 $\dot{I}_{dc2,eq\varphi}$ 分别为在换相失败后 LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 系统换变后注入交流电网的各相等值电流源; F_{AC} 、 F_{IDC} 、 F_{2DC} 为各自变量对 E_{φ} 的贡献函数。

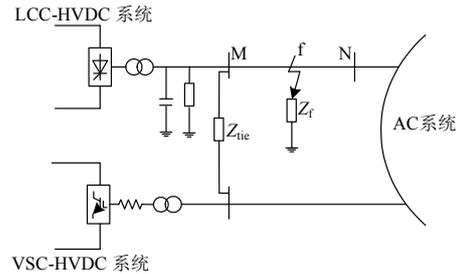


图 1 HMIDC 的交直流混联系统

Fig. 1 AC/DC interconnected system in hybrid multi-infeed HVDC

尽管直流电流 $\dot{I}_{dc1,eq\varphi}$ 、 $\dot{I}_{dc2,eq\varphi}$ 暂态过程是动态变化的,但具有时频域特性,可在给定时间段内分解为基波和各次谐波分量。由于现有的继电保护原理主要是基于工频量/工频变化量,因此下面的分析也只考虑各种暂态过程中基频分量的变化情况。

直流等值工频电流 $\dot{I}_{dc1,eq\varphi}$ 、 $\dot{I}_{dc2,eq\varphi}$ 主要通过仿真获得,而 LCC-HVDC 直流系统在换相失败程度相同(即故障后逆变站母线 M 处电压相同), $\dot{I}_{dc1,eq\varphi}$ 的動作特性相似^[10];又 VSC-HVDC 逆变站采用定交流电压控制, $\dot{I}_{dc2,eq\varphi}$ 動作特性只与逆变侧电压有关;因此保护电气量可以通过图 2 等效电路求得。

2 HMIDC 系统等值工频电流变化特性

换相失败后 HMIDC 注入交流电网故障点,流

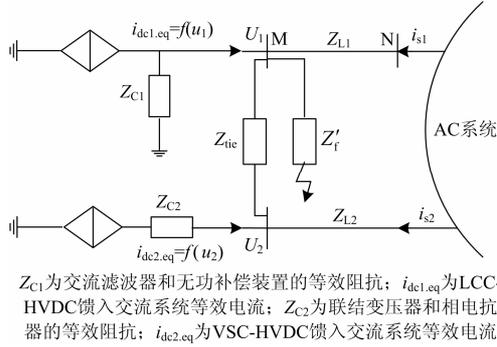


图 2 HMIDC 系统交流线路故障等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit model of hybrid multi-infeed HVDC at AC line fault

经保护 M 处的等值工频电流为

$$\dot{I}_{dc,eq\varphi}'' = \dot{I}'_{dc1,eq\varphi} + \dot{I}'_{dc2,eq\varphi} + \dot{I}_{s2\varphi}$$

其电流工频及工频变化量向量图如图 3 所示，因 LCC-HVDC 逆变侧通常采用全补偿方式。正常运行时 LCC-HVDC 等值电流 $\dot{I}_{dc1,eq\varphi}$ 与 $\dot{U}_{1\varphi}$ 可视为同相位，又逆变侧无功消耗约为其直流功率的 50%~60%，则 $\dot{I}_{dc1\varphi}$ 超前 $\dot{U}_{1\varphi}$ 角度约为 30°。根据逆变站换相失败时开关函数模型和直流电流暂态变化模型理论可知，卷积得到故障后电流 $\dot{I}'_{dc1\varphi}$ 幅值略有减少，相位则超前于正常运行时候的 $\dot{I}_{dc1\varphi}$ [13]；受端交流系统短路电流 $\dot{I}_{s2\varphi}$ 受系统等效阻抗和受端系统等值电源到故障处线路阻抗之和的影响；VSC 可以看成是一个无转动惯量的电动机或发电机，几乎可以瞬时实现有功功率和无功功率的独立调节，其输出电流 $\dot{I}'_{dc2,eq\varphi}$ 仅受其端电压的阻抗 $Z_{dc2,eq}$ 决定 [14]， $Z_{dc2,eq} = Z_{C2}$ 。

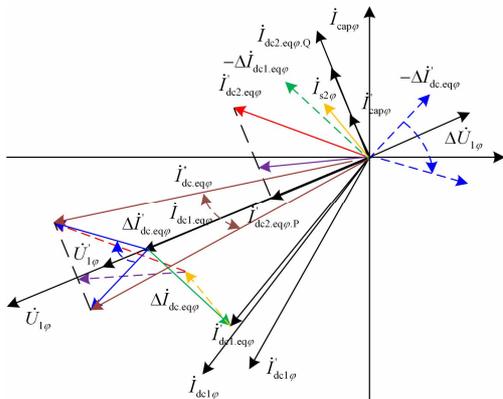


图 3 HMIDC 系统等值工频及工频变化量电流
Fig. 3 Equivalent current of power-frequency and power-frequency component variation of hybrid multi-infeed HVDC

由图 3 可知，假设在换相失败时，交流母线电

压只有幅值跌落，无相位的变化。单条 LCC-HVDC 馈入时，直流系统等值工频变化量电流超前于电压，使得受端交流电网继电保护感受到的等值工频变化量阻抗呈容性，可能会造成继电保护元件不正确动作。而 HMIDC 系统换相失败时，VSC-HVDC 提供一定的无功电流 $\dot{I}'_{dc2,eq\varphi,Q}$ ；受端系统提供短路电流 $\dot{I}_{s2\varphi}$ ，改变了受端交流电网继电保护感受到的等值工频变化量阻抗特性，有利于保护正确动作。

3 HMIDC 系统等值工频变化量阻抗模型

工频变化量方向元件是利用故障时电压、电流中故障分量判断故障方向的一种元件，实际上是基于阻抗特性判断的 [15]。图 4 给出了 MN 线路 f 处发生故障的各相附加电路。

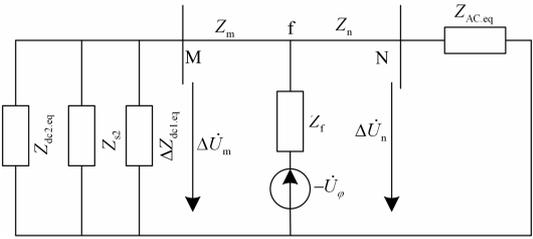


图 4 MN 线路故障附加电路
Fig. 4 Fault superimposed circuit for fault in line MN

分析 MN 线路工频变化量方向元件的动作特性，主要是获得 HMIDC 在交流线路发生故障并引发复故障时的等值工频变化量阻抗变化特点。即从工频变化量方向的角度看，M 处 HMIDC 工频变化量阻抗 $\Delta Z_{dc,eq} = Z_{dc2,eq} // Z_{s2} // \Delta Z_{dc1,eq}$ 以何种特性馈入交流电网。由图 4 可知，对于一定的电网， Z_{s2} 、 $Z_{dc2,eq}$ 是已知的。因此，要求取 $\Delta Z_{dc,eq}$ ，关键是获得 LCC-HVDC 因故障换相失败时的 $\Delta Z_{dc1,eq}$ 。

短路比(SCR)定义为交流系统短路容量与直流换流器额定功率之比 [16]，即

$$SCR = \frac{S_{AC}}{P_{dcN}} = \frac{U_N^2}{Z_{s1} P_{dcN}}$$

又受端交流系统等效电源 $\dot{E}_{eq} \approx \dot{U}_N$

单条 LCC-HVDC:

$$SCR \ell^{j\delta 1} \approx \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_{s1} \dot{I}_{dc,eq}} \quad (1)$$

HMIDC: 因换流站联络线电气距离较短，可以忽略， $Z_{s2} + Z_{tie} \approx Z_{s2}$

$$SCR \ell^{j\delta 2} \approx \frac{(\frac{\dot{E}_{eq}}{Z_s} + \dot{I}'_{dc2,eq}) \dot{U}_N}{P_{dcN}} = \frac{(\frac{\dot{E}_{eq}}{Z_s} + \dot{I}'_{dc2,eq})}{\dot{I}_{dc1,eq}} \quad (2)$$

$SCR\ell^{j\delta^2}$ 其值还可以通过附录 A 求出。

由图 2 可知, 正常运行时

$$\dot{E}_{eq} - \dot{U}_1 = \dot{I}_{s1} Z_{s1} = -\dot{I}_{dc,eq} Z_{s1} \quad (3)$$

故障后(无 VSC-HVDC 馈入):

$$\dot{U}'_1 = (\dot{I}'_{dc,eq} + \frac{\dot{E}_{eq} - \dot{U}'_1}{Z_{s1}}) Z'_f \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知

$$\Delta \dot{U}'_1 = \dot{E}_{eq} (\frac{Z_{\Sigma}}{Z_{s1}} - 1) + \Delta \dot{I}_{dc,eq} (Z_{\Sigma}) + \dot{I}_{dc,eq} (Z_{\Sigma} - Z_{s1}) \quad (5)$$

式中: $\Delta \dot{U}'_1 = \dot{U}'_1 - \dot{U}_1$; $\Delta \dot{I}_{dc,eq} = \dot{I}'_{dc,eq} - \dot{I}_{dc,eq}$; $Z_{\Sigma} = Z'_f // Z_{s1}$; $Z_{s1} = Z_{AC,eq} + Z_{L1}$ 。

从交流系统看进去直流等值工频变化量阻抗为

$$\Delta Z'_{dc1,eq} = \frac{\Delta \dot{U}'_1}{-\Delta \dot{I}'_{dc,eq}} = -Z_{\Sigma} - (Z_{\Sigma} - Z_{s1}) \cdot \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_{s1} \Delta \dot{I}'_{dc,eq}} \left(\frac{\dot{I}_{dc,eq} Z_{s1}}{\dot{E}_{eq}} + 1 \right) \quad (6)$$

将式(1)代入式(6), 可得

$$\Delta Z'_{dc1,eq} = \frac{\Delta \dot{U}'_1}{-\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} = -Z_{\Sigma} - (Z_{\Sigma} - Z_{s1}) \cdot \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_{s1} \Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} \left(\frac{1}{SCR\ell^{j\delta_1}} + 1 \right) \quad (7)$$

含 VSC-HVDC 馈入的 HMIDC 系统故障后:

$$\dot{U}''_1 = (\dot{I}''_{dc1,eq} + \frac{\dot{E}_{eq} - \dot{U}''_1}{Z_{s1}} + \dot{I}'_{dc2,eq} + \frac{\dot{E}_{eq} - \dot{U}''_2}{Z_{s2}}) Z'_f$$

因换流站电气距离较近, $\dot{U}''_2 = \dot{U}''_1$, 由此可得

$$\dot{U}''_1 = (\dot{I}''_{dc1,eq} + \dot{I}'_{dc2,eq}) Z'_{\Sigma} + \dot{E}_{eq} \frac{Z'_f}{Z_s} \quad (8)$$

式(3)和式(8)相加可得

$$\Delta \dot{U}'_1 = \dot{E}_{eq} \left(\frac{Z'_{\Sigma}}{Z_s} - 1 \right) + \Delta \dot{I}'_{dc1,eq} Z'_{\Sigma} + \dot{I}'_{dc1,eq} (Z'_{\Sigma} - Z_{s1}) + \dot{I}'_{dc2,eq} Z'_{\Sigma}$$

式中: $\Delta \dot{U}'_1 = \dot{U}'_1 - \dot{U}_1$; $\Delta \dot{I}'_{dc1,eq} = \dot{I}''_{dc1,eq} - \dot{I}_{dc1,eq}$;

$Z'_{\Sigma} = Z'_f // Z_s$; $Z_{s2} = Z_{AC,eq} + Z_{L2}$; $Z_s = Z_{s1} // Z_{s2}$ 。

从交流系统看进去, HMIDC 等值工频变化量阻抗为

$$\Delta Z'_{dc1,eq} = \frac{\Delta \dot{U}'_1}{-\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} = -Z'_{\Sigma} - (Z'_{\Sigma} - Z_{s1}) \cdot \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_{s1} \Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} \left(\frac{\dot{I}_{dc1,eq} Z_{s1}}{\dot{E}_{eq}} + 1 \right) - \frac{Z'_f \dot{I}'_{dc1,eq}}{\Delta \dot{I}'_{dc1,eq} \dot{I}_{dc1,eq}} \left(\frac{\dot{E}_{eq}}{Z_s} + \dot{I}'_{dc2,eq} \right) + \frac{Z'_{\Sigma}}{\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_{s1} \dot{I}_{dc1,eq}} \dot{I}_{dc1,eq} \quad (9)$$

将式(1)、式(2)代入式(9)可得

$$\Delta Z'_{dc1,eq} = \frac{\Delta \dot{U}'_1}{-\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} = -(Z'_{\Sigma} - Z_{s1}) \cdot \frac{\dot{E}_{eq}}{Z_{s1} \Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} \left(\frac{1}{SCR\ell^{j\delta_1}} + 1 \right) - Z'_{\Sigma} - \frac{Z'_f \dot{I}_{dc1,eq}}{\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} SCR\ell^{j\delta_2} + \frac{Z'_f \dot{I}_{dc1,eq}}{\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}} SCR\ell^{j\delta_1} \quad (10)$$

由式(10)可知, HMIDC 中 LCC-HVDC 子系统等值阻抗 $\Delta Z'_{dc1,eq}$ 与多个因素有关, 包括系统阻抗 $Z_{AC,eq}$, 线路阻抗 Z_{L1} 、 Z_{L2} , 短路阻抗 Z'_f 、短路比 $SCR\ell^{j\delta_1}$ 、 $SCR\ell^{j\delta_2}$ 以及 LCC-HVDC 子系统等值工频变化量电流 $\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}$ 等。因此, 对于给定的 HMIDC 的交直流互联系统, 在交流电网故障并引发换相失败时, 只要获得 LCC-HVDC 系统的等值电流 $\dot{I}''_{dc1,eq}$ (相当于 $\Delta \dot{I}'_{dc1,eq}$), 可通过式(10)计算出的 $\Delta Z'_{dc1,eq}$ 来求取 HMIDC 系统等值工频变化量阻抗 $\Delta Z_{dc,eq}$ 。

由式(7)、式(10)对比分析可知, HMIDC 系统中 LCC-HVDC 子系统等值阻抗 $\Delta Z'_{dc1,eq}$, 相比于单馈入 LCC-HVDC 系统等值阻抗幅值大小是减小的, 而相位变化不大。

4 HMIDC 等值工频变化量阻抗仿真分析

LCC-HVDC 系统换相失败暂态过程的等值工频变化量电流是分析 HMIDC 工频变化量阻抗变化特性的关键所在。由于 LCC-HVDC 换相失败暂态过程较为复杂, 尚无精确的定量计算方法, 本文采用电磁暂态仿真的方法分析其等值电流变化情况。该 HMIDC 系统模型如图 1 所示, LCC-HVDC 子系统参数和控制系统与 CIGRE 标准测试模型相同; VSC-HVDC 系统整流侧采用定交流电压定直流电压控制, 逆变侧采用定交流电压定有功功率 $P=200$ MW 控制, 其部分参数见表 1。

表 1 混合 MIDC 系统仿真模型参数

Table 1 Hybrid multi-infeed HVDC system parameters in simulation model

	VSC-HVDC	LCC-HVDC
容量	328 MVA/300 MW	
直流电压	110 kV	
开关频率	1 950 Hz	同 GIGRE 标准
换流站等效电阻	0.026 45 Ω	测试模型
换流站等效电抗	72.4 mH	
换流站变压器变比	230/125	
线路 $Z=0.04 \Omega/(X/R=6)$	$L_1=20$ km	$L_2=100$ km
受端交流系统	SCR = 2.5 @ 75.0 deg	
联络线	5 km	

为更好地分析所述 HMIDC 系统, 与馈入同一交流系统的单条 LCC-HVDC 对比研究, 除了无

VSC-HVDC 系统、 Z_{L2} 外, 其他部分接线和参数同图 1、表 1。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下对两种不同结构的直流系统等效电流、等值阻抗特性进行了研究。根据图 2 所示等效电路, 假设 100Ω 的 AB 两相电感性短路接地故障, 2 s 时发生在这两种不同结构的 LCC-HVDC 逆变站母线 1 处, 持续时间 0.05 s, 过后故障消除, 系统恢复正常运行。由于篇幅有限, 本文仅以 A 相为例, 对其进行对比分析。仿真中等值工频变化量电流、阻抗均为 A 相电流、阻抗。

图 5(a)给出了故障时 LCC-HVDC 系统等值工频变化量 A 相电流(换流变交流侧 A 相电流)的变化情况, 即电流幅值与正常电流幅值差的变化。在故障发生时刻, 单馈入 LCC-HVDC 等值电流略有增大, 随之换相失败和控制系统的的作用下, 等值直流会迅速减小; 而含有 VSC-HVDC 馈入的 HMIDC 系统, LCC-HVDC 等值电流增大后再跌落, 变化要缓慢很多; 图 5(b)给出了该故障时, 以正常电流相位为参考, 两种结构中 LCC-HVDC 系统 A 相等值工频变化量电流相位的变化情况。

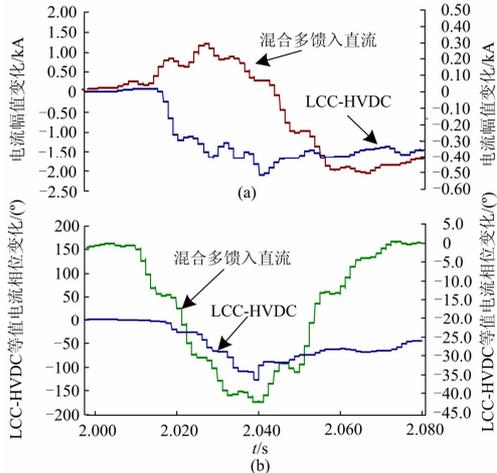


图 5 LCC-HVDC 系统换相失败等值工频变化量电流
Fig. 5 Equivalent power frequency current variation of LCC-HVDC system under commutation failure

图 6 是根据图 5 仿真出的 $\Delta \dot{I}_{dc1,eq}$, 利用式(7)、式(10)计算得到的 A 相 $\Delta Z_{dc1,eq}$ (虚线)和仿真直接计算出的 A 相 $\Delta Z_{dc1,eq}$ (实线)。由图可知, 仿真值和计算值基本一致; SCR 值越大, 误差越小。因此, 只要知道 $\Delta \dot{I}_{dc1,eq}$, 就能准确计算出 $\Delta Z_{dc1,eq}$ 。

单条 LCC-HVDC 馈入系统, 母线 1 发生故障, 电压瞬间跌落引起换相失败, 在低压限流控制(Low Voltage Current Limited Control, VDCLC)下, 工频变化量阻抗在换相失败瞬间会达到一个很大的值, 且其阻抗特性呈容性, 如图 6(b)所示。而含有 VSC-HVDC 的 HMIDC 系统, 当 LCC-HVDC 发生

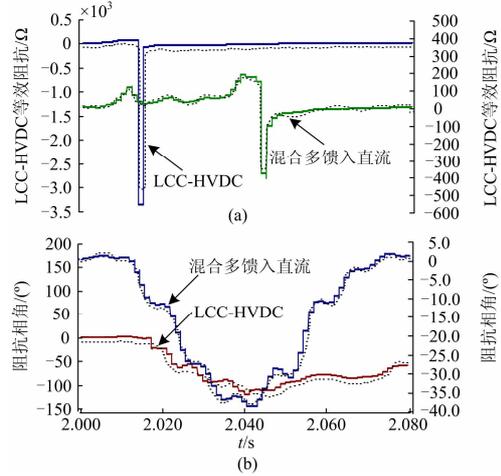


图 6 LCC-HVDC 系统换相失败等值工频变化量阻抗
Fig. 6 LCC-HVDC system equivalent impedance based on power-frequency variation under commutation failure

相同故障并导致换相失败, 在 VSC-HVDC 系统和受端交流系统的共同作用下, 母线 1 电压故障期间跌落得比较缓慢, LCC-HVDC 系统的等值阻抗在故障初期其大小变化不大, 但阻抗角容性程度降低很多。当电压跌落到一定程度, LCC-HVDC 还是会会发生换相失败, 其工频变化量阻抗幅值略微增大。

图 7 给出了 HMIDC 系统 A 相等值阻抗 $\Delta Z_{dc,eq}$ 计算值(虚线)、仿真值(实线)。在一定强度的交流系统和一定容量的 VSC-HVDC 系统共同“竞争”下, 会使 LCC-HVDC 因换相失败导致交流电网继电保护感受到背侧系统工频变化量阻抗幅值略微减小, 表明文章第三节理论分析的准确性; 相角由容性转换成感性, 验证了图 3 向量图的正确性。可知 HMIDC 系统有助于继电保护的正确动作。

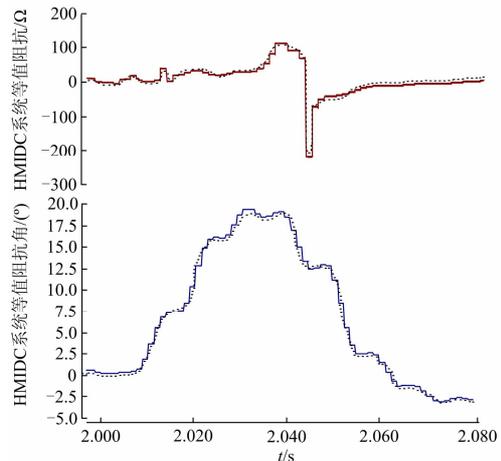


图 7 HMIDC 等值工频变化量阻抗
Fig. 7 Hybrid multi-infeed HVDC impedance based on power-frequency variation under commutation failure

5 结论

本文建立了 HMIDC 的交直流混联系统模型, 与馈入同一交流系统的单条 LCC-HVDC 的 GIGRE 标准测试模型进行对比分析。理论分析了 HMIDC 的交直流混联系统, 交流线路故障期间的相互作用机理。根据工频变化量方向保护原理的分析特点, 指出 LCC-HVDC 换相失败时的工频变化量等值阻抗决定着 HMIDC 系统工频变化量等值阻抗特性。最后对这两种结构的工频变化量等值电流、阻抗特性进行了理论和仿真验证分析。结果表明, HMIDC 系统可以有效改善 LCC-HVDC 系统因受端交流电网故障引发换相失败, 导致工频变化量阻抗呈现容性特征, 避免交流电网继电保护误动作, 为现阶段传统直流电网规划提供了新的解决思路; 定量计算 HMIDC 馈入后工频变化量阻抗方向保护动作特性理论方法, 可以准确评估 HMIDC 规划后, 交流电网继电保护是否存在安全隐患。

附录 A

混合 MIDC 系统 SCR 计算方法。

根据混合 MIDC 系统图 1 可以得到 LCC-HVDC 子系统逆变侧交流母线三相短路等效电路图, 如图 A。

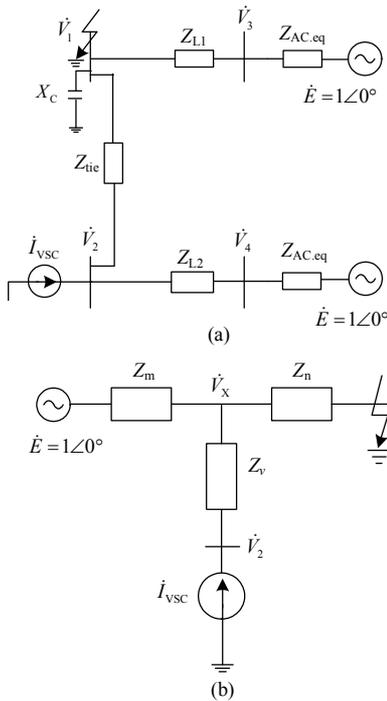


图 A HMIDC 中 LCC-HVDC 子系统逆变侧交流母线三相短路等效电路图

Fig. A Equivalent circuits of the simple HMIDC system under the three-phase short circuit in the inverter side of the LCC-HVDC subsystem

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\text{VSC}} &= 1.5 \times \frac{S_{\text{VSC}}}{\sqrt{3}V_2} (\cos \phi + j \sin \phi) = \\ & I_{\text{VSC}} \cos \phi + j I_{\text{VSC}} \sin \phi \\ \dot{I}_{\text{sc}} &= \frac{\dot{V}_X}{Z_n} = \frac{Z_n - Z_n Z_m \dot{I}_{\text{VSC}}}{Z_n (Z_n + Z_m)} = \frac{1 - Z_m \dot{I}_{\text{VSC}}}{(Z_n + Z_m)} \\ \text{SCR} \ell^{j\delta^2} &= \frac{S_{\text{sc}}}{P_{\text{dc}}} = \frac{\sqrt{3} \dot{V}_{1\text{N}} \dot{I}_{\text{sc}}}{P_{\text{dc}}} \end{aligned}$$

式中: S_{VSC} 是 VSC 的额定容量; V_2 是母线 2 额定电压有效值; ϕ 是 \dot{I}_{VSC} 参照电动势 \dot{E} 的相角; $\dot{V}_{1\text{N}}$ 是母线 1 的额定电压有效值。

参考文献

- [1] 张璞, 王钢, 李海锋, 等. 直流馈入下的输电线路电流差动保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 1-5.
ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Performance of current differential protection for transmission lines in HVDC/AC interconnected system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 1-5.
- [2] 雷虹云, 于占勋, 赵强, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(二)直流换相失败瞬态特征分析及对交流线路保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 65-71.
LEI Hongyun, YU Zhanxun, ZHAO Qiang, et al. Study on influence of HVDC commutation failure on AC line protection: part two: analysis of fault transient response characteristics and influence of HVDC commutation failure on AC line protections[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 65-71.
- [3] 裘愉涛, 陈水耀, 杨恢宏, 等. 交直流混联系统突变量方向元件适用性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 115-120.
QIU Yutao, CHEN Shuiyao, YANG Huihong, et al. Research on applicability of directional element based on the power frequency variation in AC-DC hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 115-120.
- [4] 李响, 韩民晓. 海上风电串联多端 VSC-HVDC 协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 42-48.
LI Xiang, HAN Minxiao. A coordinated control strategy of series multi-terminal VSC-HVDC for offshore wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 42-48.
- [5] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站内部暂态过电压[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 111-119.

- DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Research on transient overvoltage for converter station of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 111-119.
- [6] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
- TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [7] 赵成勇, 孙营, 李广凯. 双馈入直流输电系统中 VSC-HVDC 的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 97-103.
- ZHAO Chengyong, SUN Ying, LI Guangkai. Control strategy of VSC-HVDC in dual-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 97-103.
- [8] 郭春义, 赵成勇, 王晶. 新型双馈入直流输电系统供电无源网络的运行特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 27(11): 211-218.
- GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, WANG Jing. Operation characteristic research on novel double-infeed HVDC system supplying passive network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 27(11): 211-218.
- [9] 沈国荣. 工频变化量方向继电器研究[J]. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 28-38.
- SHEN Guorong. A new directional relay based on the variation of power frequency components[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28-38.
- [10] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一)直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 41-46.
- LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system: part one DC-system impedance of power-frequency component variation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 41-46.
- [11] 朱韬析, 宁武军, 欧开健. 直流输电系统换相失败探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 36(23): 116-120.
- ZHU Taoxi, NING Wujun, OU Kaijian. Discussion on commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 36(23): 116-120.
- [12] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(二)故障线路的方向保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 47-53.
- LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part two: response of the directional protection for faulted line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 47-53.
- [13] 刘俊磊, 王钢, 李海峰, 等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118.
- LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on ac power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 111-118.
- [14] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [15] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [16] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

收稿日期: 2014-05-23

作者简介:

徐岩(1976-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统保护与安全控制; E-mail: Xuyan@ncepubd.edu.cn

刘泽楷(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电控制与保护。E-mail: liuzekai2007@163.com

(编辑 魏小丽)