

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190048

应用附加电容的柔性直流输电线路自适应重合闸策略

黄越¹, 李凤婷¹, 易鹏², 周嘉阳³, 冯小萍⁴

- (1. 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830047;
2. 中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830002;
3. 国网江西电力有限公司吉安供电分公司, 江西 吉安 343000; 4. 国网新疆电力有限公司继电保护处, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830018)

摘要: 针对柔性直流输电线路在故障跳闸后线路健全极与故障极不存在耦合关系和基于感应电气量变化特征的重合闸判据难以适用的问题, 提出一种基于附加电容放电电压变化特征的柔性直流输电线路自适应重合闸策略。在直流线路跳闸后投入附加电容器, 构建附加电容放电的数学模型, 分析故障消失前后附加电容放电电压特征差异。结合该差异设计出能有效识别永久性故障和瞬时性故障的柔性直流线路故障性质识别新判据, 基于此故障性质识别判据实现对线路的重合闸。最后利用 PSCAD/EMTDC 平台搭建了线路模型, 仿真验证了所提柔性直流输电线路自适应重合闸策略的有效性与可靠性。

关键词: 柔性直流输电线路; 附加电容器; 故障性质判别; 直流自适应重合闸

Adaptive reclosure scheme of MMC-HVDC transmission lines using additional capacitors

HUANG Yue¹, LI Fengting¹, YI Peng², ZHOU Jiayang³, FENG Xiaoping⁴

- (1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation and Grid Technology (Xinjiang University), Ministry of Education, Urumqi 830047, China; 2. China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Institute CO., LTD., Urumqi 830002, China; 3. Ji'an Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Company, Ji'an 343000, China; 4. Relay Protection Department, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830018, China)

Abstract: For the MMC-HVDC transmission line after the faulty trip, there is no coupling relationship between the line integrity pole and the fault pole, which makes the reclosing criterion based on characteristics of induced electrical quantities are difficult to apply. Thus an adaptive reclosing strategy for MMC-HVDC transmission lines based on the characteristics of additional capacitor discharge voltage variation is proposed. The additional capacitor is switched on after the DC line trips to construct the mathematical model of the additional capacitor discharge and then analyze the difference of the characteristics of the additional capacitor discharge voltage when there is fault and the fault disappears. Combined with the difference, a new criterion for fault property identification of the flexible DC line is designed to determine the permanent fault or the transient fault. Based on the fault characteristic identification method, the reclosing of the line is realized. Finally, the circuit model is built based on PSCAD/EMTDC to verify the validity and reliability of the adaptive reclosing strategy of the MMC-HVDC transmission line.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877185).

Key words: MMC-HVDC; additional capacitors; fault characteristic identification; DC adaptive reclosure

0 引言

柔性直流输电技术与传统直流输电技术相比, 在可靠换相、灵活控制、电能质量等方面具有明显

的优势^[1-7]。运行经验表明, 以架空线为主的电力系统, 其故障大多具有单极(相)、瞬时性的特点。故重合闸技术对于以架空线为主的直流电网的可靠运行起到了至关重要的作用, 然而重合于永久性故障会对电力系统和电力电子设备造成二次冲击, 损坏柔性直流输电设备^[8-11]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877185)

目前工程上柔性直流输电系统重启方法^[12-15]多为在故障时闭锁柔性直流换流器, 经过一段时间延时后, 重新解锁换流器/重合直流断路器, 通过能否建立直流电压来决定是否重合。这种常规重启方法存在重启无选择性的问题, 不利于系统的安全可靠运行。然而, 在柔性直流输电线路发生故障跳闸后, 线路中不存在振荡回路且没有外界能量进行补充, 导致为交流重合闸提供判据的电气量无法测量, 依照此进行重合闸的故障性质判别方法无法适用。因此需对适用于柔性直流输电线路的故障性质判别方法进行研究。

针对柔性直流输电线路故障性质判别存在的问题, 目前国内学者也提出了许多相应的解决方法^[16-19]。文献[16]提出了一种在特定子模块拓扑结构下可用的重合闸方案, 但该方案对于常规的 MMC-HVDC 系统不具有适用性。文献[17]提出了一种向直流故障线路注入特征信号的故障性质判别方法, 但该方法不适用于 HB-MMC 柔性直流输电系统。文献[18]通过判断换流站在不控整流运行方式下故障点电流的有无, 实现故障性质的判别, 并提出相应的故障重启方案, 但该方法主要针对点对点式柔性直流系统且存在重启时间相对较长的缺点。文献[19]提出了一种通过检测电压偏移量来判断故障性质的方法, 然而该方法仅适用于在故障时非故障极可正常运行的特殊结构柔性直流电网。上述所提出的故障性质判别方法, 仅适用于特定的子模块拓扑结构或特定的接线方式, 适用性存在不足。

本文提出了一种基于附加电容电压变化特性的柔性直流输电线路自适应重合闸方案, 旨在解决目前柔性直流输电线路重合闸方案缺少重启选择性的问题。该方案在线路一端接入经直流电源充电的电容来对故障线路放电, 从而给故障线路提供振荡回路。通过对不同故障性质下的附加电容电压变化特征进行区分, 实现故障性质判别, 确定故障熄弧时间, 由此判断线路是否重合闸。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台建立仿真模型, 验证本文所提重合策略的正确性与可行性。

1 柔性直流输电线路故障特性分析

1.1 附加电容器的接入方案

为给故障后的线路提供振荡回路, 在直流输电线路首端接入附加电容, 具体结构如图 1 所示。电容 C 由直流电源 DC 预充电。为使方案同时适用于极间短路故障, 应保证接入两极间的附加电容应存在一定的差值^[20]。即满足:

$$\begin{cases} u_{cmin} \geq 20\%u_{cmax} \\ \Delta u_c \geq 30\%u_{cmax} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{cmin} 和 u_{cmax} 分别为接入柔性直流线路的附加电容充电电压的最小值和最大值; Δu_c 为两极附加电容充电电压之间的差值。为避免故障出现判定盲区, 需加装补偿电感 L 和补偿电阻 R 。

在输电线路正常运行时, 电容的断路器开关 K_1 保持为常开状态。当柔性直流输电线路发生故障, 断路器跳开后, 为规避直流线路中残余电压击穿附加电容器以及对判定结果产生影响, 快速接地开关 K_a 闭合, 将线路残余电压释放后退出, 后合上开关 K_1 , 将附加电容器回路投入。测量此时的电容电压。将此时故障线路的电容放电情况与线路故障不存在时的电容放电情况进行比对, 判别故障性质, 确定故障熄弧时间。如果故障消失则对柔性直流线路重合闸。

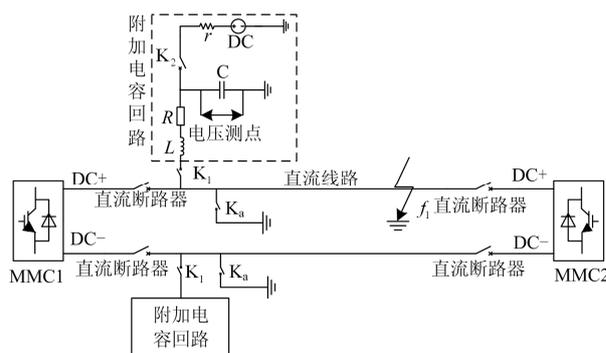


图 1 柔性直流输电线路附加电容接入方案

Fig. 1 Additional capacitor access scheme for MMC-HVDC transmission lines

1.2 故障消失前附加电容器放电特性

由于柔性直流输电线路中发生的故障大部分为单极故障, 故以线路发生单极接地故障为例, 对投入附加电容器后电容电压的变化规律进行分析。投入附加电容后, 若故障未消失, 故障线路等效电路如图 2 所示。

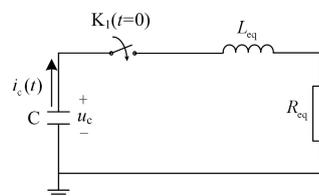


图 2 故障消失前电容放电回路等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of capacitor discharge circuit with fault

图 2 中, L_{eq} 是 C 到故障点的线路等效电感与补偿电感 L 之和; 附加电容 C 两端电压为 u_c ; R_{eq} 为故障接地过渡电阻、补偿电阻和线路等效电阻之

和。假设 $t=0$ s 时刻附加电容投入, 此时电容已充电完毕, 其电压为 U_0 , 设开关 K_1 在 $t=0$ 时刻闭合, 根据基尔霍夫电压定律(KVL), 将存在有以下关系^[21]。

$$L_{\text{eq}} C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_{\text{eq}} C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (2)$$

此时电路放电过程即为二阶电路的零输入响应。故其满足:

$$\begin{cases} u_c(0+) = u_c(0-) = U_0 \\ i(0+) = i(0-) = I_0 \end{cases} \quad (3)$$

根据电路中 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C 的参数不同, 可能会出现不同情况^[22]。当 $R_{\text{eq}} < 2\sqrt{L_{\text{eq}}/C}$ 时, 电路表现为欠阻尼振荡放电过程, 振荡幅值随时间变小; 当 $R_{\text{eq}} > 2\sqrt{L_{\text{eq}}/C}$ 时, 电路表现为过阻尼非振荡放电过程, 电容放电回路持续释放电容储存的能量直至为 0。

当 $R_{\text{eq}} < 2\sqrt{L_{\text{eq}}/C}$ 时, 由二阶电路的零输入响应, 得到电容放电电压 u_c 的表达式为

$$\begin{cases} u_c = \frac{u_c(0)\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \\ \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \\ \delta = \frac{R_{\text{eq}}}{2L_{\text{eq}}} \\ \omega_0 = \frac{1}{L_{\text{eq}}C} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right) \end{cases} \quad (4)$$

电容放电电压 u_c 为按照指数规律衰减的正弦函数, 其中 $\sin(\omega t + \beta) \in (-1, 1)$, 而 $e^{-\delta t}$ 为衰减系数, 当 $t \geq 0$ 时满足 $e^{-\delta t} \leq 1$, 即当电容放电时间 t 为定值 Δt 时, 可以得到电容电压最大值为

$$\begin{cases} u_{\text{cmax}} \leq \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\delta \Delta t} = U_0 \lambda e^{-\delta \Delta t} \\ \lambda = \sqrt{\frac{4L_{\text{eq}}}{4L_{\text{eq}} - R_{\text{eq}}^2 C}} \end{cases} \quad (5)$$

此时电容大小仅与放电回路等效电感 L_{eq} 和等效电阻 R_{eq} 有关。显然, 对于短路故障而言, 由于补偿电阻远小于补偿电感, 故放电回路等效电阻 R_{eq} 相较于等效电感 L_{eq} 小得多, 由式(5)可得, 当故障位于线路首端且不存在故障接地电阻时, 电容经 Δt 时间放电后的电容电压最大。

当 $R_{\text{eq}} > 2\sqrt{L_{\text{eq}}/C}$ 时, 由电路的二阶零输入响应, 得到电容放电电压 u_c 的表达式为

$$\begin{cases} u_c = -\frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_2 t} - p_2 e^{p_1 t}) \\ p_{1,2} = -\frac{R_{\text{eq}}}{2L_{\text{eq}}} \pm \sqrt{\left(\frac{R_{\text{eq}}}{2L_{\text{eq}}}\right)^2 - \frac{1}{L_{\text{eq}}C}} \end{cases} \quad (6)$$

当 t 为定值 Δt 时, 显然存在如下关系。

$$u_{\text{cmax}} \leq -\frac{U_0 p_1 e^{p_2 \Delta t}}{p_2 - p_1} \quad (7)$$

同理 $e^{p_2 \Delta t}$ 为衰减系数, 当 $t \geq 0$ 时满足 $e^{p_2 t} \leq 1$, 故当 t 为定值 Δt 时, 电容放电电压最大值为

$$u_{\text{cmax}} \leq -\frac{U_0 p_1 e^{p_2 \Delta t}}{p_2 - p_1} \quad (8)$$

对比式(5)与式(8), 可得当 t 为定值, 且 L_{eq} 与 R_{eq} 不变时, 电容放电电压最大值按式(5)确定。

同理可知, 当线路发生极间短路和极间短路接地故障时, 柔性直流输电线路跳闸, 故障消失前在线路两极分别接入附加电容器, 由于各级附加电容器与大地之间或两极附加电容器之间存在一定的电压差, 各级的附加电容器亦会出现明显的放(充)电现象, 使电容电压出现明显变化, 并最终逐渐衰减至零, 附加电容电压具体衰减形式仅取决于对应回路中等效电阻和等效电感之间的大小关系。

1.3 故障消失后附加电容器放电特性

当故障消失后, 附加电容电流仅能通过线路分布式电容放电, 放电电路如图 3 所示。

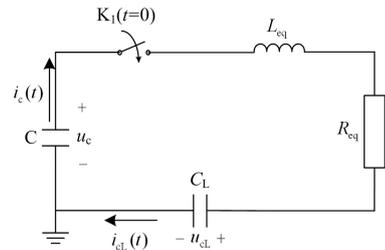


图 3 故障消失后电容放电回路等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of capacitor discharge circuit without fault

此时, 由基尔霍夫电压定律(KVL)可得

$$u_c = u_{\text{cl}} \quad (9)$$

图 3 中, 线路故障消失后, 不存在明显的放电回路, 附加电容器电容电压不会出现明显的衰减, 可依此判别故障是否消失。考虑到线路分布电容的存在, 附加电容器放电回路会出现一定幅值的高频放电现象, 电容电压只有极小幅度的衰减。

1.4 柔性直流输电线路自适应重合闸判据的提出

考虑架空线路参数与过渡电阻大小, 当故障点位于线路首端时, 电容电压的衰减量最小。当故障

消失后, 电容电压 u_c 应大于故障时电容放电电压最大值 u_{cmax} 。且整定值 ξ 为接近电容初始电压 U_0 的值, 具体大小可按式(10)确定。

$$\begin{cases} \xi = U_0 \lambda e^{-\lambda \Delta t} \\ \lambda = \sqrt{\frac{4L_s}{4L_s - R_s^2 C}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: L_s 为故障点位于线路首端时线路的等效电感; R_s 为故障点位于线路首端时线路等效电阻。由此, 据上述故障存在与故障消失后的附加电容放电特性, 提出柔性直流输电线路自适应重合闸判据如下。

在当地线路柔性直流输电线路重合闸整定动作时间 t_{set} 内反复接入电容, 每次接入的时间为 Δt 。当 Δt 时间内存在线路附加电容放电电压的大小均能大于整定值的大小时, 判定故障已经消失; 反之, 则判定故障依然存在。判据表达式如式(11)所示。

$$|u_c| > \xi \quad (11)$$

式中, u_c 为接入附加电容的电容电压。且判定时间 Δt 的设置需综合考虑线路参数、电容大小、充放电速度等因素。

2 柔性直流输电线路自适应重合闸策略

依照上述的分析, 可制定本文所提柔性直流输电线路自适应重合闸策略的流程如下, 重合闸流程如图 4 所示。

(1) 柔性直流输电线路故障跳闸, 计时器归零 ($t=0$) 并开始计时。

(2) 判定断路器跳闸的原因, 若为误动作, 柔性直流输电线路延时 15 ms 后重合; 若是人为操作, 则不重合线路; 若非上述两种情况, 转入步骤(3)。

(3) 为避免线路残余电压影响附加电容器及判定结果, 考虑柔直线路断路器切断时间 10~15 ms, 故当 $t=0.015$ s 时, 接入快速接地开关, 为保证线路电压降至接近零值, 接入时长设为 0.1 s。

(4) 考虑到线路的暂态过程及经验熄弧时间, 在 $t=0.115$ s 时, 投入附加电容器, 投入时长为 Δt 。

(5) 投入附加电容器期间, 检测附加电容放电电压的大小, 若满足式(11)所示重合闸判据, 则判定故障为暂时性且已消失, 此时切除附加电容器, 并对线路重合闸, 重合方式与步骤(2)相同, 重合闸的流程结束; 否则, 判定故障依然存在, 继续进行步骤(6)。

(6) 切除柔性直流线路附加电容器, 经 0.1 s 延时(该延期内, 接入直流源对电容重新充电后再切除直流源), 返回步骤(3), 进行循环判定。若在当地线路柔性直流输电线路重合闸整定动作时间 t_{set} 后, 判定结果仍为“故障依然存在”, 则判定故障为永久性,

重合闸闭锁。

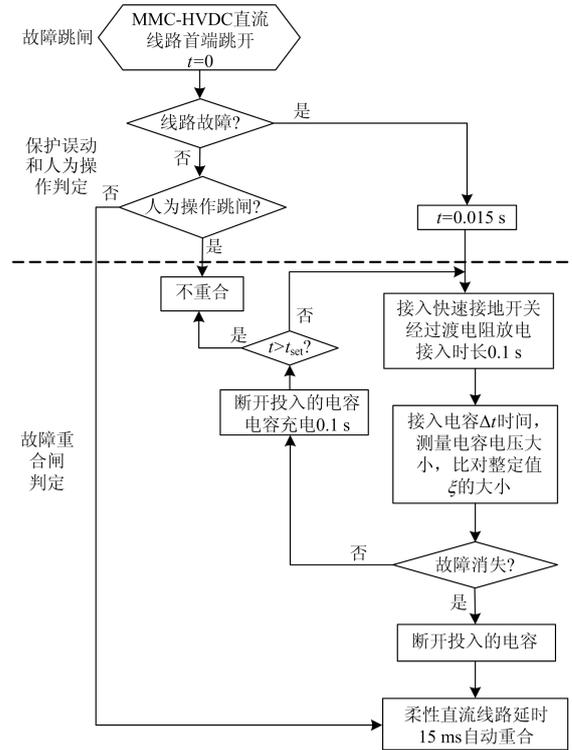


图 4 柔性直流输电线路自适应重合闸流程

Fig. 4 Flexible DC transmission line adaptive reclosing process

3 仿真实验与分析

本文以图 1 所示长度为 400 km 的 ± 320 kV 柔性直流架空输电线路来搭建仿真算例, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建 ± 320 kV 柔性直流输电线路分布参数模型, 该线路重合闸时间定值为 2 s; 故障发生时间为 1 s, 故障持续时间为 0.5 s, 快速接地开关的接入并未使故障消失; 在 1.015 s 时柔性直流输电线路跳闸; 据 1.4 节所述附加电容器 Δt 的设置方法, 设置附加电容器放电时间 Δt 为 0.1 s。输电线路单位长度电阻大小为 $0.02 \Omega/\text{km}$, 单位长度电感大小为 $0.9 \text{ mH}/\text{km}$, 单位长度分布电容大小为 $0.015 \mu\text{F}/\text{km}$, 设置附加电容器大小为 $100 \mu\text{F}$; 补偿电感大小为 0.05 H , 补偿电阻大小为 0.5Ω , 两极附加电容充电电压分别为 3 kV 和 1 kV。

3.1 附加电容放电电压波形仿真

依照上文所述, 设置短路故障为不同类型且存在不同过渡电阻的情况。考虑柔性直流线路中使用的直流断路器动作时间为 15 ms, 在故障开始 0.115 s 后第一次投入附加电容器, 1.615 s 时第二次投入附加电容器, 投入时长均为 0.1 s。由于故障时长为 0.5 s, 故第二次投入附加电容器时, 故障已消失。线路故障位置分别为 0% 线路长度(线路首端)、

50%线路长度(线路中点)和 100%线路长度(线路末端)。当故障类型不同且这些故障存在不同大小的过渡电阻时,电容放电电压波形的仿真结果如图 5—图 7 所示。根据式(10),设定判据整定值 $\zeta=1.8198\text{ kV}$ 。

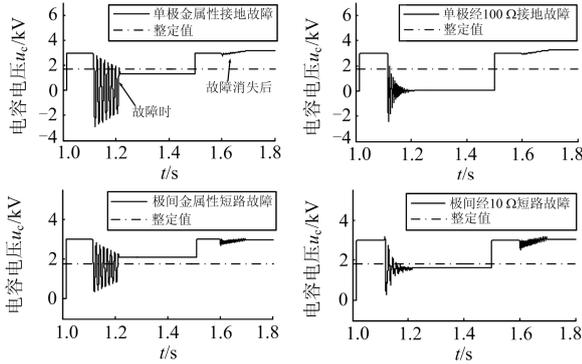


图 5 线路首端发生故障时电容放电电压波形

Fig. 5 Capacitor discharge voltage waveform when a fault occurs at the beginning of the line

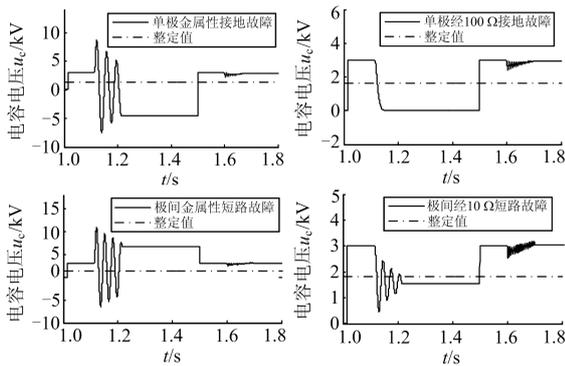


图 6 线路中点发生故障时电容放电电压波形

Fig. 6 Capacitor discharge voltage waveform when a fault occurs in the middle of the line

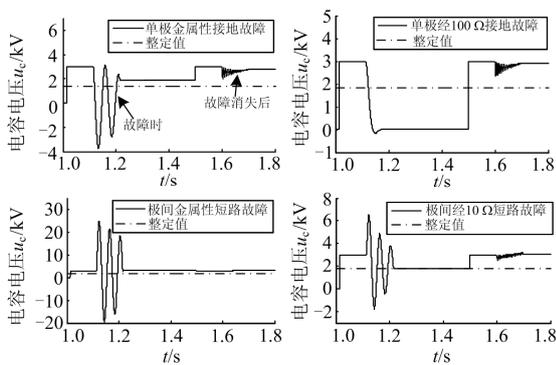


图 7 线路末端发生故障时电容放电电压波形

Fig. 7 Capacitor discharge voltage waveform when a fault occurs at end of the line

根据仿真结果可知,当柔性直流输电线路发生故障,在故障后接入附加电容器,不论故障出现于

线路的任何位置,故障线路均会出现明显的放电现象,电容电压出现明显的衰减放电过程。不同大小的过渡电阻与不同的故障类型,将会导致不同的衰减速率以及不同的放电过程。同时,在柔性直流输电线路的故障消失后,附加电容器的放电电压并未出现明显的衰减放电过程,即满足式(11)判据。

由仿真结果可知,本文所提方法具有波形易识别、整定值计算简单的特点,能快速实现对故障性质的判别。

3.2 重合闸仿真验证

设置故障时长为 0.6 s 和无穷大,依照本文所提出的柔性直流输电线路自适应重合闸判据,分别对线路不同位置发生不同类型故障,经不同接地电阻时的故障性质和是否重合闸进行判定。

单次接入附加电容器 Δt 期间,根据电容放(充)电电流,依照重合闸判据判定结果为“故障仍未消失”时,输出 1;否则,输出 0。将每次接入附加电容器后,判定输出的结果相乘,结果为 1 且循环判定时间仍未超过柔性直流重合闸整定动作时间,则继续循环,若循环判定的时间超过柔性直流输电线路重合闸整定动作时间,则判定故障为永久性。一旦结果为 0,则判定故障为暂时性且已消失,假设当地柔性直流输电线路重合闸整定动作时间为 2 s,仿真结果如表 1 所示。

表 1 线路自适应重合闸仿真结果

Table 1 Line adaptive reclosing simulation results

故障类型	过渡电阻/ Ω	故障时长/s	运算结果	判定时长/s	故障性质	是否重合闸
单极接地	0.001	0.6	0	0.815	暂时性	是
单极接地	0.001	∞	1	2	永久性	否
单极接地	100	0.6	0	0.815	暂时性	是
单极接地	100	∞	1	2	永久性	否
极间短路	0.001	0.6	0	0.815	暂时性	是
极间短路	0.001	∞	1	2	永久性	否
极间短路	10	0.6	0	0.815	暂时性	是
极间短路	10	∞	1	2	永久性	否
极间短路接地	0.001	0.6	0	0.815	暂时性	是
极间短路接地	0.001	∞	1	2	永久性	否
极间短路接地	100	0.6	0	0.815	暂时性	是
极间短路接地	100	∞	1	2	永久性	否

以瞬时性故障为例,图 8 为线路跳闸至重合的首端电压波形仿真结果。

由表 1 和图 8 仿真结果可知,对输电线路上的各种故障,本文所提故障性质识别判据均可作出准确、迅速的判断,且不受过渡电阻的影响。当故障为暂时性时,输电线路能够快速成功重合;故障为永久性时,输电线路能够可靠不重合,成功避

免了柔性直流输电线路重合于尚未消失的暂时性故障或永久性故障。

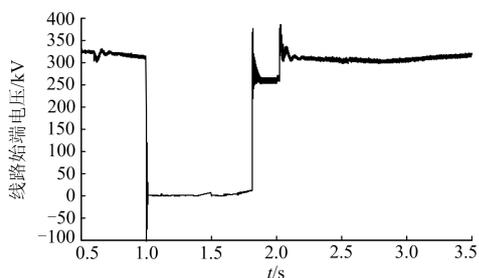


图8 瞬时性故障时线路跳闸至重合的首端电压
Fig. 8 First-end voltage of the line tripping to the coincident during transient faults

目前, 现有文献所提方法多针对特定的子模块拓扑结构和线路运行方式, 如文献[19]根据静电感应原理和直流电网运行特性进行故障性质判别与重合闸, 仅能适用于在故障时非故障极可正常运行的特殊结构柔性直流电网。而本文所用方法通过外加设备来提供振荡回路和扰动信号, 实现方法相对简单, 且能够适用于不同的子模块拓扑结构和线路运行方式。

3.3 附加电容对柔性直流正常运行的影响分析

本文通过外加设备来提供振荡回路和扰动信号, 故需考虑设备接入对柔性直流电网正常运行状态的影响。

根据图9所示仿真结果, 附加电容接入后, 柔性直流线路始端电压不发生变化, 故设备接入不会对柔性直流输电线路的正常运行产生影响。确保本文所提方法对于柔性直流线路的应用具有较好的适用性。

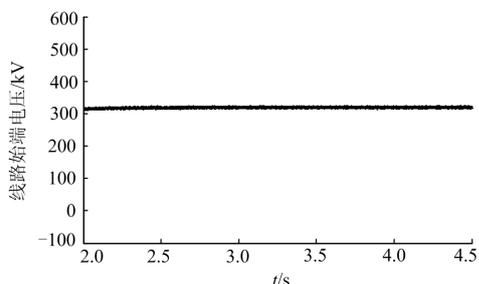


图9 正常运行状态下柔性直流输电线路始端电压
Fig. 9 Starting voltage of flexible DC transmission line under normal operating conditions

4 结论

本文提出了一种基于附加电容器放电电压的柔性直流输电线路自适应重合闸方法。该方法用于实现柔性直流线路故障中故障性质的判别, 有助于提

高线路重启的成功率, 降低重合失败所造成的对换流设备的二次冲击。依照仿真的结果, 该方案具有如下几个特点。

(1) 附加电容在故障线路中的放电电压波形较为直观, 具有较低的识别难度, 对于故障性质的判定灵敏度较高, 且不存在大量的计算。

(2) 方案具有较好的适用性, 其适用于柔性直流输电线路在不同类型故障下的自适应重合闸, 且故障位置和过渡电阻不会对其结果造成影响。

(3) 方案可用于不同类型的子模块拓扑结构和不同类型的接线方式。

本文所用方案, 虽然在柔性直流线路一端加装了相应的设备, 从而需要引入额外的控制策略, 然而, 其投资不大, 易于推广。根据3.3节的仿真结果, 本文所提方法对于柔性直流电网具有较好的适用性。

对于本文所做研究, 可进一步分析两极电容的选取方法, 防止当故障为极间短路和极间短路接地故障时出现误判。

参考文献

- [1] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.
LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.
- [3] TAO Renfeng, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Research on the protection coordination of permanent magnet synchronous generator based wind farms with low voltage ride through capability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 311-319. DOI: 10.1186/s41601-017-0050-4.
- [4] OOI B T, WANG X. Boost-type PWM HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1557-1563.
- [5] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [6] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An

- overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [7] 周嘉阳, 李凤婷, 刘渊, 等. 基于直流电抗电压的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 95-101.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, LIU Yuan, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on DC reactor voltage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 95-101.
- [8] 魏德华, 苗世洪, 刘子文, 等. 基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 75-82.
WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 75-82.
- [9] PARK J D, CANDELARIA J, MA L, et al. DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2574-2584.
- [10] 张保会. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [11] 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.
- [11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [12] 韩亮, 白小会, 陈波, 等. 张北±500 kV 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 42-47.
HAN Liang, BAI Xiaohui, CHEN Bo, et al. Control and protection system design of Zhangbei ±500 kV converter station in VSC-HVDC power grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 42-47.
- [13] 和敬涵, 黄威博, 李海英, 等. FBMMC 直流故障穿越机理及故障清除策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 1-7.
HE Jinghan, HUANG Weibo, LI Haiying, et al. FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 1-7.
- [14] 张峻樑, 向往, 林卫星, 等. 基于混合型 MMC 和直流开关的柔性直流电网直流故障保护研究[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 52-58.
ZHANG Junjie, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. DC fault protection of VSC-HVDC grid based on hybrid MMC and DC switch[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 52-58.
- [15] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [16] 王一, 刘建政. 用于 MMC-HVDC 直流故障保护的新型拓扑及重合闸控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2312-2319.
WANG Yi, LIU Jianzheng. An enhanced MMC-HVDC topology and system recovery strategy for DC fault protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2312-2319.
- [17] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用全桥 MMC 注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 149-156.
SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injected by FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 149-156.
- [18] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 柔性直流输电系统新型故障重启方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 77-85.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Novel restart scheme of DC fault for flexible DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 77-85.
- [19] 薛士敏, 廉杰, 齐金龙, 等. MMC-HVDC 故障暂态特性及自适应重合闸技术[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4015-4021.
XUE Shimin, LIAN Jie, QI Jinlong, et al. Fault transient characteristic and adaptive reclosing technique of MMC-HVDC network[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4015-4021.
- [20] XIE Chao, LI Fengting. Online parameter determination based adaptive single-phase reclosing scheme for wind-powered outgoing lines with shunt reactors[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(8): 1317-1328.
- [21] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 高仁栋, 吴在军, 范文超, 等. 基于电流微分初始值的 VSC 直流配电网系统线路故障定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 27-33.
GAO Rendong, WU Zaijun, FAN Wenchao, et al. Line fault location method of VSC-based DC distribution system based on initial current differential value[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 27-33.

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-05-06

作者简介:

黄 越(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流电网保护技术; E-mail: 523082263@qq.com

李凤婷(1965—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为含间歇性能源、负荷的系统运行控制与保护。E-mail: xjlf2009@sina.com

(编辑 许 威)