

基于感性模糊识别的MMC直流输电线路 单极接地故障分析

安娜^{1,2}, 束洪春^{1,2}, 郭瑜², 杨博¹, 曹璞璘¹, 薄志谦¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 伪双极模块化多电平换流器(MMC)直流输电系统发生单极接地故障时的故障电流较小, 在高阻故障下故障电流更是极其微弱, 很难快速识别单极接地故障。考虑MMC直流输电系统中, 单极接地故障暂态过程与其他类故障暂态过程的故障回路的区别, 提出一种基于感性模糊识别的单极接地故障识别方法。利用电流变化率与电压的相关系数近似表征回路测量点的电感特征, 定义正、负极相关系数的比值为感性模糊系数。根据感性模糊系数的符号识别单极接地故障, 然后根据感性模糊系数的绝对值判断故障极。大量仿真实验表明, 所提方法有较强的速动性和灵敏性, 并有很强的耐受过渡电阻能力。

关键词: MMC直流输电系统; 单极接地故障; 故障识别; 感性模糊系数; 过渡电阻; 暂态过程

中图分类号: TM 77

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202102001

0 引言

近十年来, 可再生能源在全球范围内蓬勃发展, 可再生能源大量渗透到电网中已成为一种普遍现象, 被发达国家和发展中国家视为智能电网的未来趋势^[1-2]。然而, 可再生能源固有的高随机性和间歇性不可避免地导致了诸多问题^[3], 特别是可再生能源通常远离负荷中心, 有效的远距离大容量输电对于保证可靠可控的电力供应至关重要。高压直流输电由于其技术和经济上的独特优势, 广泛应用于远距离大容量输电和大区联网。且高压直流输电系统还可实现两大电力系统的非同期联网运行和不同频率的电力系统的联网, 即异步互联^[4-5]。

与传统直流输电系统相比, 模块化多电平换流器(MMC)直流输电系统^[6]具有诸多优点, 如没有无功补偿和换相失败问题, 可以为无源系统供电, 可同时独立调节有功功率和无功功率, 可柔性控制且损耗低等, 成为了当前的研究热点^[7-10]。MMC是一种新型的拓扑结构, 能够有效地补偿晶闸管换流变换器的缺陷, 解决传统的二、三电平电压源变换器开关频率高、损耗大的问题。MMC的子模块结构相对简单, 易于控制, 可以方便地扩展到高电压、大容量的领域, 因此对于该领域的研究显得尤为重要。

由于远距离大容量输电的需求越来越多, 采用架空线路的MMC直流输电系统越来越受到重视。直流输电线路保护主要包括行波保护、直流欠压保

护、差动保护等, 其中行波保护为主保护, 其他为后备保护^[11]。行波保护和直流欠压保护在发生高阻接地故障时容易拒动, 实际运行中已多次出现行波保护在高阻接地故障下拒动的情况^[12-13]; 差动保护时延长, 难以发挥其后备保护的作用^[14-15]。直流输电线路发生单极接地故障的概率较大, 而伪双极直流输电系统发生单极接地故障时, 故障电流较小, 快速识别故障的难度较高。而故障暂态过后达到稳态阶段时, 故障极电压降低至0, 非故障极电压幅值上升1倍^[16], 这就要求直流输电线路绝缘有较高的水平, 因此能够快速识别单极接地故障有重要意义。文献^[17]针对单极接地故障提出了一种利用控制子模块触发主动脉冲的故障定位方法, 但并未提及如何在较短时间内甄别出单极接地故障。

本文通过对MMC直流输电线路的电感特征进行相关性分析, 提出了一种基于感性模糊系数的MMC直流输电线路单极接地故障识别方法。PSCAD仿真结果验证了本文方法有很强的耐受过渡电阻能力。

1 MMC直流输电拓扑结构

MMC直流输电系统主要由两端的MMC换流站和直流输电线路组成, 早期投运的MMC直流输电系统大多采用伪双极系统接线^[9]。MMC直流输电系统结构如图1所示。图中, 两端交流系统均是有源网络, 交流侧采用额定电压为230 kV、频率为50 Hz的交流系统等效模型; 换流变压器阀侧绕组采用三角形联结方式, 无中性点; 换流变压器交流侧绕组均采用星形联结方式, 其中性点直接接地; 直流侧经箝位电阻接地, 箝位电阻阻值很大, 主要功能是箝位两极电压和正常运行时提供直流系统的电位参考点^[16]; 直流电压为 ± 320 kV, 直流输电线路长度为400 km,

收稿日期: 2020-04-19; 修回日期: 2020-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52037003, 51807085); 云南省重大科技专项计划项目(202002AF080001)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52037003, 51807085) and the Key Science and Technology Project of Yunnan Province(202002AF080001)

额定功率为 $1200 \text{ MV} \cdot \text{A}$; 在 MMC 直流输电线路换流站出口处设置 4 个观测点, 在观测点处可以测得相应的电压和电流; u_{Rp} 、 u_{Rn} 和 u_{Ip} 、 u_{In} 分别为整流侧和逆变侧正、负极电压(虚线框中的接地符号仅表示两极电压均为对地电压, 实际并未接地); T_1 、 T_2 为换流变压器; R_d 为箝位电阻; i_{Rp} 、 i_{Rn} 分别为整流侧正、负极电流, i_{Ip} 、 i_{In} 分别为逆变侧正、负极电流, 电流的参考方向用箭头表示。MMC 电路拓扑结构如图 2 所示, 图中, 桥臂电感 $L_0 = 50 \text{ mH}$; 子模块电容 $C_0 = 2800 \text{ } \mu\text{F}$; U_{dc} 为正、负极间电压; I_{dc} 为换流变压器直流侧电流; u_{SM} 为子模块电压。

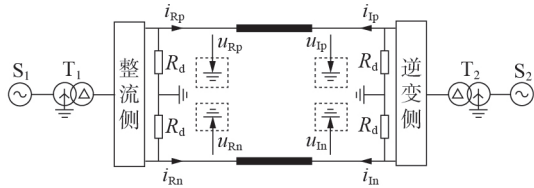


图1 MMC 直流输电系统结构

Fig.1 Structure of MMC DC transmission system

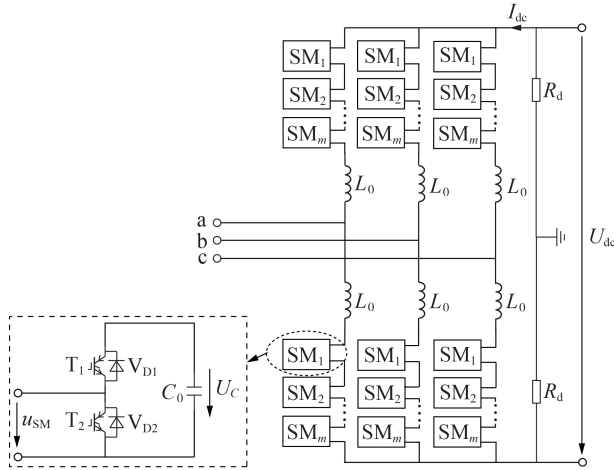


图2 MMC 拓扑结构

Fig.2 Topology structure of MMC

2 MMC 直流输电线路单极接地故障分析

图 1 所示的 MMC 直流输电系统采用直流侧母线经箝位电阻接地方式。直流侧是通过 2 个大电阻接地箝位两极直流电压, 为直流系统提供电位参考点, 当 MMC 直流输电系统发生单极接地故障时, 由于两端换流器阀侧均是三角形接线, 没有接地点, 而直流侧箝位电阻阻值很大, 近似开路, 对于交流侧而言理论上只改变了直流系统的电位参考点, 直流输电系统仍可输送功率^[16]。一般采用伪双极系统接线的 MMC 直流输电系统发生单极接地故障时, 整个双极系统就会全部失去^[7], 而直流侧母线经箝位电阻接地仍可输送功率。对于直流输电线路而言, 故障暂态过后达到稳态阶段时, 故障极电压降低至 0, 非故障极电压被箝位而上升 1 倍, 正、负极间电压 U_{dc}

将保持不变。这就对非故障极的绝缘水平提出了较高要求, 因此需快速诊断出单极接地故障。

2.1 发生单极接地故障后的暂态过程

若 MMC 直流输电系统在正极线路 f_1 处发生单极接地故障, 由于输电线路分布电容的存在, 故障极经过渡电阻 R_f 接地后, 非故障极的分布电容与故障极共同构成故障暂态电流通路^[18], 如图 3 所示。 f_1 处发生单极接地故障后, 2 个回路的电流 i_1 和 i_2 的大小与两端线路的阻抗有关, 而线路的阻抗和线路的长度有关, 线路越长, 阻抗越大, 分流就越小。本文中定义故障距离 l 为故障点到整流侧的距离, 不同故障距离下的故障电流如图 4 所示。由图 4 可见, 故障距离越小, 线路阻抗越小, 则与 i_2 相比, i_1 的幅值越大, 振荡也更明显; 在线路中间位置发生故障时, 两端线路阻抗相等, $i_1 \approx i_2$; 单极接地故障的故障电流很小, 与引言中叙述一致。

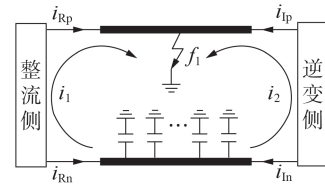


图3 发生单极接地故障时的故障电流示意图

Fig.3 Schematic diagram of fault current during single pole-to-ground fault

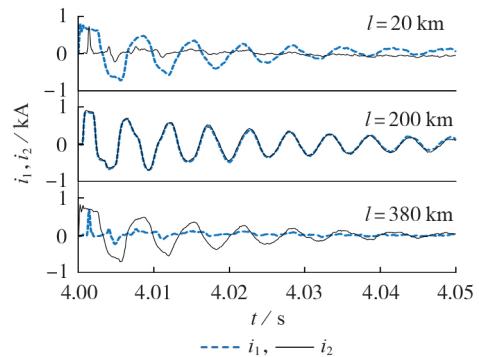


图4 发生单极接地故障时的电流故障分量

Fig.4 Fault components of current during single pole-to-ground fault

2.2 单极接地故障电感特性分析

由上文可知, MMC 直流输电线路发生单极接地故障后, 故障极与非故障极的分布电容以及两端的换流站共同构成故障暂态电流通路, 由于输电线路存在分布电阻和电感, 故该故障的暂态电路是一个复杂的 RLC 二阶电路。从图 4 也可以看出, 发生单极接地故障后的输电系统是一个二阶电路系统。本文从电感特性角度分析单极接地故障与其他故障的特征差异。易知电感元件的电压和电流关系为:

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

本文利用观测点的电压与电流变化率的相关性

来分析故障后 MMC 直流输电系统在观测点表现出的电感特性。Person 相关系数利用协方差和方差来度量 2 个变量的相关程度,具有不受变量幅值大小影响的特点^[19-20],其离散表达式如式(2)所示。

$$\rho = \rho(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^n \left(x_k - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right) \left(y_k - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n \left(x_k - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \right)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(y_k - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right)^2}} \quad (2)$$

其中, x, y 为不同的变量, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, 本文中 x, y 分别对应 $di/dt, u$; n 为采样点数。

若 $\rho=1$, 则 di/dt 和 u 的正相关性为最强, 即两者的变化规律、波形完全相同; 若 $\rho=-1$, 则 di/dt 和 u 的负相关性为最强, 即两者的变化规律相反、波形关于零轴对称; 当 $|\rho|$ 接近 0 时, 表示 di/dt 和 u 的相关性极弱, 即两者的变化规律差异较大、波形相似度极低。

对于单极接地故障, 观测点的电流变化率与电压的相关关系与 MMC 内部结构、输电线路的长度有关。对于确定的系统, MMC 内部结构已经确定, 因此观测点的电流变化率与电压的相关系数 ρ 主要与线路长度有关。随着线路长度的增加, 线路容性特征越来越明显, 感性特征相对减弱, 因此输电线路越长, 观测点得到的 ρ 值越小。

输电线路的不同位置发生正极经 $0.01, 100 \Omega$ 过渡电阻接地故障时, 整流侧和逆变侧正、负极的电流变化率与电压的相关系数的沿线分布特性如图 5 所示。图中, ρ_R, ρ_I 分别为整流侧、逆变侧相关系数。

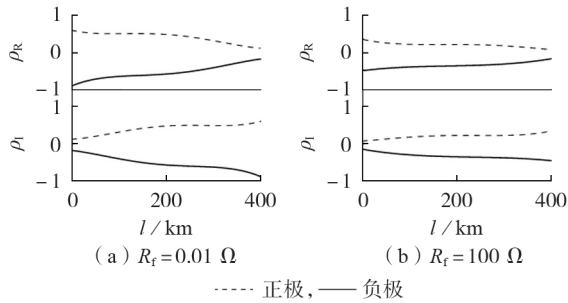


图5 发生单极接地故障时,整流侧和逆变侧的正、负极相关系数

Fig.5 Correlation coefficients of positive and negative poles at rectifier and inverter sides during single pole-to-ground fault

从图5中可以看出,发生近端故障(距离整流侧近的故障)时,整流侧正极线路电流变化率与电压的相关系数为正,且绝对值较大,随着故障距离的增加,正极线路电流变化率与电压的正相关性逐渐减弱,相关系数绝对值减小,但相关系数始终为正;整流侧负极线路相关系数在发生近端故障时为负,且绝对值较大,随着故障距离的增加,电流变化率与电

压的相关性减弱,相关系数的绝对值减小,但相关系数始终为负。发生整流侧近端故障时,逆变侧电流变化率与电压的相关性与整流侧的情况相反:逆变侧正极线路的电流变化率与电压的相关系数为正且接近 0,表现为弱的正相关性,随着故障距离的增加,相关系数的绝对值增大,电流变化率与电压的正相关性增强;逆变侧的负极线路电流变化率与电压的相关系数为负且绝对值较小,表现为弱的负相关性,随着故障距离的增加,相关系数的绝对值增大,电流变化率与电压的负相关性增强。另外,由图5还可看出,线路同一侧正、负极观测点的电流变化率与电压的相关系数基本为一正、一负。

上述结论也可理论证明。整流侧电流故障分量 i_i 的电流方向如图3所示,设整流侧出口处正极和负极电压的故障分量分别为 u_{gp} 和 u_{gn} , 电压非故障分量分别为 u_{fp} 和 u_{fn} , 由于单极接地故障只改变了直流系统的电位参考点,直流侧母线仍可输送功率,设极间电压在故障前后保持不变。则有:

$$u_{gp} + u_{fp} - (u_{gn} + u_{fn}) = u_{fp} - u_{fn} \quad (3)$$

可以得到:

$$u_{gp} - u_{gn} = 0 \quad (4)$$

设 Δt 时间内的电流故障分量增量为 Δi_i , 由于正极输电线路观测点电流方向与故障回路电流方向一致, 负极线路观测点电流方向与故障回路电流方向相反, 则负极线路观测点的电流故障分量增量为 $-\Delta i_i$ 。将上述电流故障分量增量与电压故障分量分别代入式(2), 正、负极观测点故障分量的电流变化率与电压的相关系数满足:

$$\rho(\Delta i_i / \Delta t, u_{gp}) / \rho(-\Delta i_i / \Delta t, u_{gn}) = -1 \quad (5)$$

由于式(5)是在极间电压在故障前后恒定不变的前提下得到的, 若暂态过程中极间电压有轻微波动, 加上非故障分量的影响, 正、负极观测点电流变化率与电压的相关系数的比值不为 -1, 但仍为负数。

MMC 直流输电线路的单极接地故障过渡电阻的变化对 RLC 暂态故障电路有一定的影响。不同过渡电阻下, 整流侧正极线路电流变化率与电压的相关系数沿线分布特性见图6, 可见电流变化率与电压的相关系数会随着过渡电阻的增大而减小。

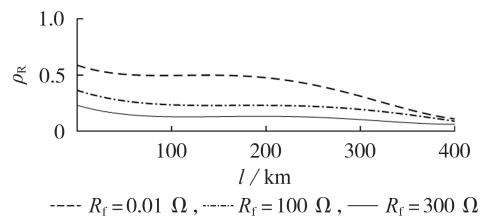


图6 不同单极接地故障过渡电阻下的相关系数

Fig.6 Correlation coefficients during single pole-to-ground fault with different transition resistances

综上所述,MMC直流输电线路发生单极接地故障时,故障极的电流变化率和电压的相关系数基本为正值,非故障极的电流变化率和电压的相关系数基本为负值,且后者的绝对值略大于前者的绝对值;同一故障位置的电流变化率与电压的相关系数随着过渡电阻的增加而减小。

3 对其他故障与正常情况的分析

3.1 双极短路故障

双极短路故障的后果较严重,故障电流非常大,会损坏IGBT等电力电子设备。MMC直流输电线路发生双极短路故障后,线路正、负极电压和极间电压均下降,下降的幅值与故障处的过渡电阻有关。若发生金属性双极短路,则输电线路电压幅值均下降为0。由于直流输电线路双极短路故障的故障回路是由换流站正、负极线路与故障点构成,所以双极短路故障的暂态过程与单极接地故障的暂态过程有很大的区别。发生故障距离分别为20、200、380 km的双极短路故障时,整流侧和逆变侧电流的故障分量如图7所示。由图可见,近端电流故障分量相对较大,且双极短路故障电流远大于单极接地故障电流。

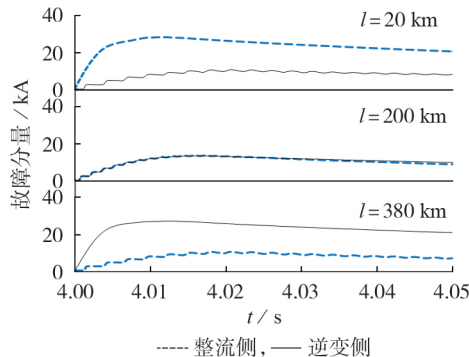


图7 发生双极短路故障时的电流故障分量
Fig.7 Fault components of current during bipolar short circuit fault

发生双极短路故障时,整流侧与逆变侧正、负极线路的电流变化率和电压的相关系数沿线分布特性如图8所示。由图可见:发生双极短路故障时,正、负极线路的电流变化率与电压的相关系数波形基本重合;过渡电阻对相关系数的影响明显,但同一侧的正、负极观测点得到的电流变化率与电压的相关系数非常接近,两者的比值受过渡电阻的影响不大。

3.2 交流侧故障

发生交流侧故障时,由于换流变压器等设备的存在,电压和电流的变化相对平缓,两侧正、负极观测点得到的电流变化率与电压的相关系数与MMC直流输电系统、故障点过渡电阻有关。发生交流侧故障时,正、负极的电流变化率与电压的相关系数如图9所示。图中,故障类型1—6分别表示整流侧单

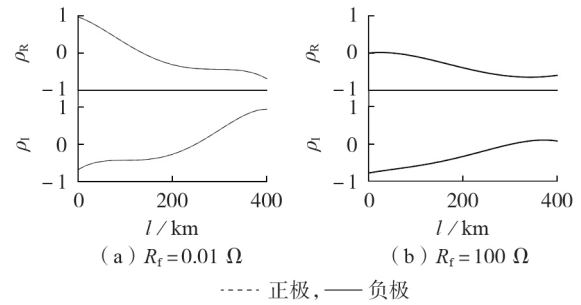


图8 发生双极短路故障时,整流侧和逆变侧的正、负极相关系数

Fig.8 Correlation coefficients of positive and negative poles at rectifier and inverter sides during bipolar short circuit fault

相接地故障、整流侧两相接地故障、整流侧三相短路故障、逆变侧单相接地故障、逆变侧两相接地故障、逆变侧三相短路故障。由图可见:发生交流侧故障时,正、负极线路的电流变化率与电压的相关系数会由于过渡电阻的变化而有所不同;同一侧的正、负极观测点得到的相关系数非常接近,两者的比值受过渡电阻的影响不大。

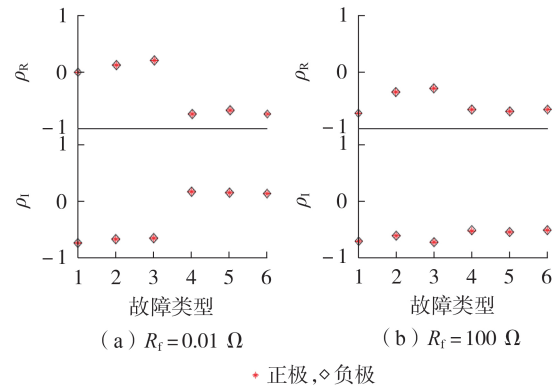


图9 发生交流侧故障时,不同过渡电阻下的相关系数
Fig.9 Correlation coefficients during AC side fault with different transition resistances

3.3 正常情况分析

正常情况下的4个测量点的电流变化率与电压的相关系数图见附录中图A1。由图可见,正常情况下同一侧正、负极观测点得到的电流变化率与电压的相关系数非常接近,且主要为负值。

4 单极接地故障的感性模糊识别

4.1 感性模糊识别算法

由前文分析可知,MMC直流输电线路发生单极接地故障时,故障极的电流变化率与电压的相关系数主要为正值,非故障极的相关系数主要为负值。故障极的故障分量相关系数为正值,非故障极的故障分量相关系数为负值,而正常情况下的电流变化率与电压的相关系数主要为负值,即非故障分量的

相关系数为负值,所以非故障极的电流变化率与电压的相关系数绝对值略大于故障极的相关系数绝对值。另外,单极接地故障下,同一侧正、负极2个观测点的电流变化率与电压的相关系数基本为一正一负。MMC直流输电系统发生其他类型的故障时,同一侧正、负极的电流变化率与电压的相关系数符号一致,且绝对值非常接近。

设 $\rho_{jp} = \rho(di_{jp}/dt, u_{jp})$, $\rho_{jn} = \rho(di_{jn}/dt, u_{jn})$ 分别为正极、负极线路电流变化率与电压的相关系数,其中 $j=R$ 和 $j=I$ 分别表示整流侧和逆变侧,则两者的比值 D_j 为:

$$D_j = \frac{\rho_{jp}}{\rho_{jn}} = \frac{\rho(di_{jp}/dt, u_{jp})}{\rho(di_{jn}/dt, u_{jn})} \quad j=R, I \quad (6)$$

本文基于电感特性角度分析故障,电流变化率与电压的关系在一定程度上体现了电路的电感特性,采用相关系数分析两者的关系在一定程度上不属于精确计算。为方便叙述,本文将 D_j 定义为感性模糊系数,则可知MMC直流输电线路发生单极接地故障时 $D_j < 0$,而发生其他类型的故障时 $D_j > 0$ 。

发生远端单极接地故障(假设故障位置在整流侧)时,电流变化率和电压的相关性较弱,对应的相关系数接近0,由于测量误差和计算误差等因素,该情况下的整流侧感性模糊系数 D_R 可能为正值,但是对于逆变侧而言该故障为近端故障,逆变侧电流变化率和电压的相关性很强,对应的相关系数也较大,逆变侧感性模糊系数 D_I 一定为负值。因此只要有一侧的感性模糊系数为负值就可以判断发生了单极接地故障,也可以表述为只要数值较小的感性模糊系数为负值就可以判定为单极接地故障,由此可得:

$$\min(D_R, D_I) < 0 \quad (7)$$

由前文可知,MMC直流输电系统发生单极接地故障时,故障极电流变化率与电压的相关系数绝对值略小于非故障极对应的相关系数绝对值。则由式(6)可知:发生正极输电线路接地故障时, $|D_j| < 1$;发生负极输电线路接地故障时, $|D_j| > 1$ 。由此可得故障极判别公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} \text{正极故障: } |D_R| < 1 \text{ 且 } |D_I| < 1 \\ \text{负极故障: } |D_R| > 1 \text{ 且 } |D_I| > 1 \end{cases} \quad (8)$$

4.2 耐受过渡电阻能力分析

由前文可知,发生单极接地故障时,电流变化率与电压的相关系数会随着过渡电阻的变化呈现明显的变化,但正、负极输电线路的相关系数基本为一正一负,且故障极的相关系数绝对值小于非故障极的相关系数绝对值, $D_j < 0$;对于其他类型的故障,电流变化率与电压的相关系数会随着过渡电阻的变化呈

现明显变化,但正、负极输电线路相关系数基本相等, $D_j > 0$ 。因此,虽然相关系数受过渡电阻的影响明显,但 D_j 受过渡电阻的影响较小。发生正极接地故障时, D_j 在不同过渡电阻下的沿线分布特性图见附录中图A2。从图中可以看出,感性模糊系数具有很强的耐受过渡电阻能力,随着过渡电阻的增大,感性模糊系数有轻微变化,但是其正、负性没有发生改变,为绝对值小于1的负数。

综上所述,无论MMC直流输电系统发生何种故障,电流变化率与电压的相关系数总会随着过渡电阻的改变而呈现变化,但是相关系数的比值,即感性模糊系数 D_j 受过渡电阻的影响较小:发生单极接地故障时, $D_j < 0$,且正极接地故障下 $|D_j| < 1$,负极接地故障下 $|D_j| > 1$;发生双极短路故障和交流侧故障时,感性模糊系数 D_j 为正值,且接近于1。因此本文所提利用感性模糊识别单极接地故障的方法具有很强的耐受过渡电阻能力,与容易拒动的传统直流行波保护相比,有较强的鲁棒性。

4.3 故障识别流程

首先分别计算整流侧和逆变侧的感性模糊系数,然后根据式(7)判断MMC直流输电线路是否发生了单极接地故障,若发生了单极接地故障,则根据式(8)判断故障极。单极接地故障识别流程见附录中图A3。

4.4 仿真实验

在PSCAD仿真软件上搭建如图1所示的MMC直流输电系统仿真模型,直流线路采用频变模型,采样频率为10 kHz,数据长度采用10 ms。为了验证本文方法的有效性,进行了大量仿真实验,将部分仿真结果列在表1和表2中。表中,P-G表示正极接地故障;N-G表示负极接地故障;L-L表示双极短路故障;R-ABG表示整流侧交流系统两相短路接地故障;I-AG表示逆变侧交流系统单相接地故障;Y、N分别表示是、否。由表1可见,本文方法能够正确识

表1 故障识别结果

Table 1 Results of fault recognition

故障类型	l / km	R_f / Ω	D_R	D_I	$\min(D_R, D_I) < 0?$	识别结果
P-G	40	0.01	-0.73	-0.70	Y	单极接地故障
P-G	180	0.01	-0.83	-0.88	Y	单极接地故障
P-G	220	100	-0.71	-0.64	Y	单极接地故障
P-G	300	300	-0.61	-0.67	Y	单极接地故障
N-G	90	0.01	-1.26	-1.32	Y	单极接地故障
N-G	120	100	-1.53	-1.46	Y	单极接地故障
N-G	250	300	-1.58	-1.44	Y	单极接地故障
L-L	60	0.01	1	1	N	其他情况
L-L	100	100	1	1	N	其他情况
L-L	320	300	1	1	N	其他情况
R-ABG	—	0.01	1	1	N	其他情况
I-AG	—	100	1	1	N	其他情况

表2 故障选极结果

Table 2 Results of fault pole identification

故障类型	l/km	R_f/Ω	D_R	D_I	$ D_R < 1$ 且 $ D_I < 1$?	$ D_R > 1$ 且 $ D_I > 1$?	选极结果
P-G	40	0.01	-0.73	-0.70	Y	N	正极
P-G	180	0.01	-0.83	-0.88	Y	N	正极
P-G	220	100	-0.71	-0.64	Y	N	正极
P-G	300	300	-0.61	-0.67	Y	N	正极
N-G	90	0.01	-1.26	-1.32	N	Y	负极
N-G	120	100	-1.53	-1.46	N	Y	负极
N-G	250	300	-1.58	-1.44	N	Y	负极

别出 MMC 直流输电系统单极接地故障,并将两极短路故障和交流系统故障识别为其他情况。由表 2 可见,本文方法能够正确识别 MMC 直流输电系统单极接地故障的故障极。

5 结论

本文根据 MMC 直流输电系统单极接地故障暂态过程与其他类型故障暂态过程的故障回路特点有明显区别,提出一种基于感性模糊识别的单极接地故障识别方法:MMC 直流输电系统发生单极接地故障时感性模糊系数为负值;发生双极短路故障、交流侧故障及正常运行时感性模糊系数为接近于 1 的正值;由于 MMC 直流输电系统故障极的电流变化率与电压的相关系数绝对值小于非故障极,所以发生正极接地故障时感性模糊系数的绝对值小于 1,发生负极接地故障时感性模糊系数的绝对值大于 1。本文方法能在较短时间内快速可靠识别单极接地故障并判断出故障极,并有很强的耐受过渡电阻能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李响,王志新,刘文晋. 海上风电柔性直流输电变流器的研究与开发[J]. 电力自动化设备,2009,29(2):10-14,20.
LI Xiang,WANG Zhixin,LIU Wenjin. Flexible direct current transmission converter for offshore wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(2):10-14,20.
- [2] 唐西胜,邓卫,李苏宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103,108.
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103,108.
- [3] YANG Bo,YU Tao,ZHANG Xiaoshun,et al. Dynamic leader based collective intelligence for maximum power point tracking of PV systems affected by partial shading condition[J]. Energy Conversion Management,2019,179:286-303.
- [4] ANDERSEN B R,XU Lie. Hybrid HVDC system for power transmission to island networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1884-1890.
- [5] ZHENG Xiaodong,TAI Nengling,THORP J S,et al. A transient harmonic current protection scheme for HVDC transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(2):2278-2285.
- [6] TTRAINER D R,DAVIDSON C C,OATES C D M,et al. A new hybrid voltage-sourced converter for HVDC power transmission[C]//CIGRE 2010. Paris,France:CIGRE,2010:1-12.
- [7] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2016:8-9,178-179.
- [8] 钱纹,赵岳恒,邢法财,等. MMC 的交直流侧扰动特性分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):114-120.
QIAN Wen,ZHAO Yueheng,XING Facai,et al. AC- and DC-side disturbance characteristic analysis of MMC[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):114-120.
- [9] 宁连营,邵能灵,郑晓冬,等. 基于自定义差分电流的 MMC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):87-93,133.
NING Lianying,TAI Nengling,ZHENG Xiaodong,et al. Pilot protection for MMC-HVDC transmission line based on custom difference current[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(17):87-93,133.
- [10] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-37.
ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-37.
- [11] 束洪春,田鑫萃,董俊,等. ± 800 kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):179-188.
SHU Hongchun,TIAN Xincui,DONG Jun,et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ± 800 kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(31):179-188.
- [12] 高杉,林圣,何正友. 基于行波固有频率一、二次频差的 HVDC 输电线路纵联保护方法[J]. 电网技术,2015,39(7):2002-2009.
GAO Shan,LIN Sheng,HE Zhengyou. A HVDC transmission line pilot protection method based on frequency difference between dominant natural frequency and secondary natural frequency of traveling wave[J]. Power System Technology,2015,39(7):2002-2009.
- [13] 李小鹏,汤涌,朱清代,等. 利用测量波阻抗相位特征的高压直流输电线路纵联保护[J]. 电网技术,2018,42(4):1251-1258.
LI Xiaopeng,TANG Yong,ZHU Qingdai,et al. Pilot protection for HVDC transmission lines utilizing phase features of measured surge impedance[J]. Power System Technology,2018,42(4):1251-1258.
- [14] 武文,吴学智,荆龙,等. 基于虚拟电阻的 MMC 子模块故障容错环流抑制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):161-168.
WU Wen,WU Xuezhong,JING Long,et al. Circulating current suppressing strategy of modular multilevel converter in submodule fault-tolerant control mode based on virtual resistor[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):161-168.
- [15] 肖亮,徐政,刘昇,等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 送端交流故障穿越策略[J]. 电工技术学报,2016,31(15):89-98.
XIAO Liang,XU Zheng,LIU Sheng,et al. AC fault ride through strategy of MMC-HVDC connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(15):89-98.
- [16] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
ZHAO Chengyong,CHEN Xiaofang,CAO Chungang,et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(23):82-87.
- [17] BI Tianshu,WANG Shuai,JIA Ke. Single pole-to-ground fault location method for MMC-HVDC system using active pulse[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2018,12(2):

272-278.

- [18] BADRKHANI A F, IRAVANI R. Cable surge arrester operation due to transient overvoltages under DC-side faults in the MMC-HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1213-1222.
- [19] AHLGREN P, JARNEVING B, ROUSSEAU R. Requirements for a cocitation similarity measure, with special reference to Pearson's correlation coefficient[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2003, 54(6): 550-560.
- [20] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019.
- BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings

of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019.

作者简介:



安娜

安娜(1985—),女,河北定州人,博士研究生,主要研究方向为输变电设备及自动化(E-mail:anna073000@163.com);

束洪春(1961—),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电力系统新型继电保护与故障测距、故障录波、数字信号处理应用等(E-mail:kmshe@sina.com);

郭瑜(1971—),男,云南昆明人,教授,博士研究生导师,研究方向为机电系统故障诊断(E-mail:kmgary@163.com)。

(编辑 任思思)

Single pole-to-ground fault analysis of MMC DC transmission lines based on inductance fuzzy identification

AN Na^{1,2}, SHU Hongchun^{1,2}, GUO Yu², YANG Bo¹, CAO Pulin¹, BO Zhiqian¹

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Fault current of pseudo-bipolar MMC (Modular Multilevel Converter) DC (Direct Current) transmission system is relatively small under single pole-to-ground fault, and becomes extremely small under high-resistance fault, so it is difficult to identify single pole-to-ground fault quickly. Considering that for MMC DC transmission system, the characteristics of fault circuit in transient process of single pole-to-ground fault are different from that of other faults in MMC DC transmission system, a single pole-to-ground fault recognition method based on inductance fuzzy identification is proposed. The correlation coefficient between current change rate and voltage is used to approximately represent inductance characteristics at the loop measurement points. Meanwhile, the ratio of positive and negative correlation coefficients is defined as the inductance fuzzy coefficient. The single pole-to-ground fault is identified according to the sign of inductance fuzzy coefficient, while the fault pole is identified according to the absolute value of inductance fuzzy coefficient. A large number of simulation show that the proposed method has high speed and sensitivity and strong anti-transition resistance ability.

Key words: MMC DC transmission system; single pole-to-ground fault; fault identification; inductance fuzzy coefficient; transition resistance; transient process

附录



Fig.A1 Correlation coefficients for normal condition

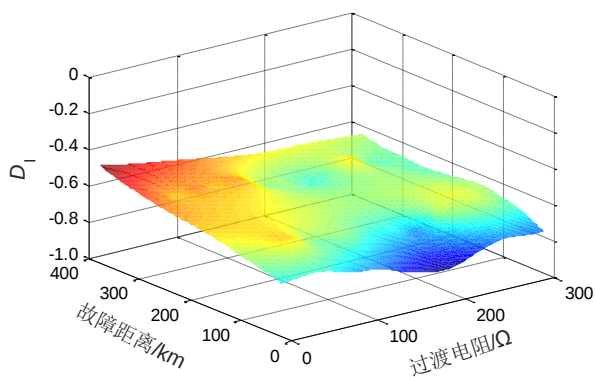
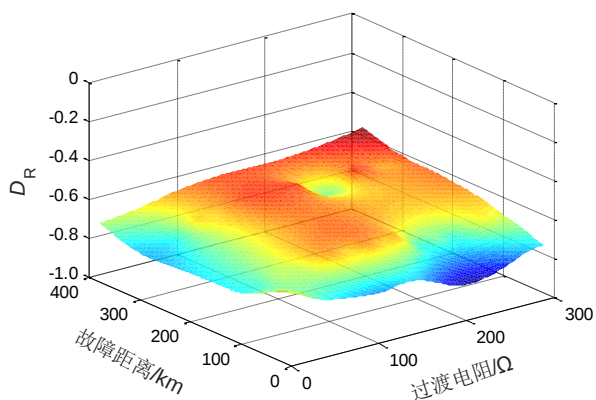


图 A2 不同过渡电阻下的感性模糊系数

Fig.A2 Inductance fuzzy coefficients with different fault resistances

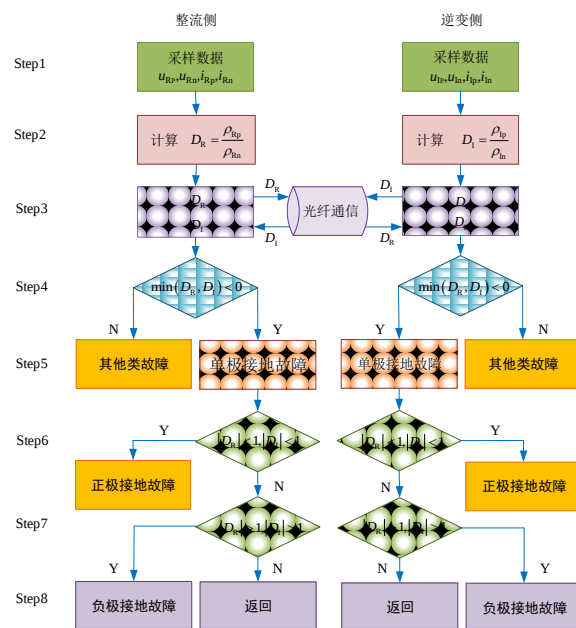


图 A3 故障识别流程图

Fig.A3 Flowchart of fault identification