

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.001

基于波形相关性的直流配电网主动式接地故障选线

王晨清, 陈实, 齐贝贝, 孔祥平, 李鹏, 高磊

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:采用小电流接地方式的直流配电网发生单极接地故障时故障特征较弱,为准确可靠选出故障线路,文中提出基于注入信号波形相关性的接地故障选线方法。所提方法首先将预先设计的附加控制策略施加于直流配电网的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)上,实现探测信号注入。然后结合零模网络,得出故障特征为:各条健全馈线首端计算的特定频率零模电流流向相同,而其与故障馈线首端计算的零模电流流向相反。最后,基于该故障特征设计选线判据,引入皮尔森相关性系数比较各条馈线的归一化零模电流和总归一化零模电流的相关性,根据健全馈线相关性系数接近于1、故障馈线相关性系数接近于-1的特征完成故障选线。仿真结果表明,所提方法在高阻接地故障下能可靠识别发生在母线或各条馈线任意位置的单极接地故障。

关键词:直流配电网;模块化多电平换流器(MMC);小电流接地故障选线;注入信号;零模网络;归一化电流;皮尔森相关性系数

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)03-0002-09

0 引言

相比于传统交流配电技术,直流配电技术凭借易于接纳新能源设备、控制灵活迅速、电能质量高等优势受到广泛关注^[1-5]。在直流配电网相关研究中,辐射状拓扑凭借投资成本低、控制配合相对容易等优点成为工程实践中较为常用的结构。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)因输出波形质量好、控制灵活、具备故障自清除能力,成为直流配电网中应用广泛的换流设备。

基于MMC的柔性直流配电系统广泛采用大电阻接地方式,无论是交流侧接地还是直流侧接地,在发生单极接地故障时,允许系统带故障工作一段时间。然而,这一方式也带来了单极接地故障后故障电流小、故障特征不明显的问题,为故障选线带来了挑战^[6-8]。目前,国内外针对配电系统小电流接地选线技术的研究主要分为2类。第1类方法借助换流器并联电容或线路对地电容在故障时向故障支路放电形成的故障特征进行选线。文献[9]基于故障馈线和健全馈线暂态相电流频率特性的差异识别故障馈线,考虑到小电流接地故障时暂态信号持续时间极短,该方法可靠性较低。文献[10]分析暂态电流分布特征,提出不受电流互感器接反问题影响的故障识别方法。文献[11]利用电压源换流器(voltage-sourced converter, VSC)直流并联电容放电脉冲实现故障选线,然而MMC不设置直流并

联滤波电容,因此该方法不适用于基于MMC的柔性直流配电系统。文献[12]基于变相位系数-电磁时间反演实现多端故障选线,但该方法对检测设备采样频率的要求较高。综上,第1类方法普遍存在故障特征持续时间极短的问题,进而影响选线判据的可靠性。

第2类方法是在故障后利用电力电子设备等装置向配电网注入某类特征信号,基于该信号及其响应识别故障^[13-16]。此类方法若需要附加额外注入设备,则会导致经济性大大降低。而目前利用既有电力电子换流设备增添附加控制实现探测信号注入的方法具有一定的应用前景。例如文献[15]利用附加控制注入正弦信号,从而计算零模阻抗,进而识别故障馈线,不需要额外注入装置,能够有效提高故障识别的可靠性和灵敏度。该方法为了保证自举性,需要电压和电流量构造保护判据,因此对电压、电流互感器的精度和同步性提出了较高要求。

综上所述,文中提出一种基于注入信号波形相关性的直流配电系统小电流接地选线方案。通过借助附加控制,在保护启动后主动注入特定频率的探测信号,增强故障特征。依据各条健全馈线首端计算的特定频率零模电流流向相同,而其与故障馈线首端计算零模电流流向相反的特征,引入皮尔森相关性系数进行选线。仿真结果表明,线路经高阻接地时,所提方案仍能准确选线,具备一定的灵敏度,且注入信号持续时间可控,利于降低对测量和保护装置的采样率要求。

收稿日期:2022-12-03;修回日期:2023-02-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501600)

1 信号注入方法及响应信号分析

1.1 信号注入方法

为简化分析,在建立故障等效电路时,首先对配电线路做两步简化。(1)考虑到直流配电网广泛采用带屏蔽层的单芯电缆,因此可忽略线路之间的互阻抗参数;(2)考虑到配电线路长度一般不超过20 km,将线路模型简化为集中参数等效的 Γ 模型。据此,建立直流配电网某回馈线发生正极接地故障时,在注入频率下的等效网络,如图1所示。

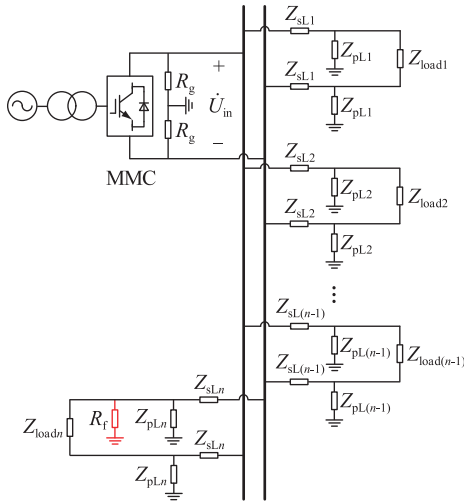


图1 直流配电网在注入频率下的故障等效电路
Fig.1 Fault equivalent circuit of DC distribution network at injection frequency

图1中, R_g 为MMC的直流侧接地大电阻; \dot{U}_{in} 为注入的直流母线极间电压; Z_{slk} 为第 k 条馈线的线路串联阻抗, $Z_{slk} = R_{slk} + jX_{slk}$, R_{slk} 、 X_{slk} 分别为 Z_{slk} 对应的电阻和电抗, $k=1,2,\dots,n$; Z_{plk} 为第 k 条馈线的线路对地阻抗, $Z_{plk} = R_{plk} + jX_{plk}$, R_{plk} 、 X_{plk} 分别为 Z_{plk} 对应的电阻和电抗; Z_{loadk} 为第 k 条馈线上所接的负荷;假设第 n 条馈线发生故障, R_f 为故障支路的过渡电阻。

正常运行时,系统正负极电路对称,两极参数在数值上相等,因而正负极对地电压数值相等,相位相反,系统零模电压为0。系统发生单极接地故障时,故障极增加了一条包含过渡电阻的故障支路,系统正负极的对称性被破坏,相应地产生了零模电压,即:

$$\dot{U}_{in0} = \frac{\sqrt{2}}{2}(\dot{U}_{inP} + \dot{U}_{inN}) = \frac{\sqrt{2}}{2}\dot{U}_{in} \frac{Z_{Psum} - Z_{Nsum}}{Z_{Psum} + Z_{Nsum}} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_{inP} 、 \dot{U}_{inN} 分别为直流母线正负极对地电压; Z_{Psum} 、 Z_{Nsum} 分别为各条线路正负极对地参数总的

并联阻抗。

$$\begin{cases} Z_{Psum} = 1 / \left[\sum_{k=1}^{n-1} (Z_{slk} + Z_{plk})^{-1} + \left(Z_{sln} + \frac{R_f Z_{pln}}{R_f + Z_{pln}} \right)^{-1} + \frac{1}{R_g} \right] \\ Z_{Nsum} = 1 / \left[\sum_{k=1}^n (Z_{slk} + Z_{plk})^{-1} + \frac{1}{R_g} \right] \end{cases} \quad (2)$$

注入特定频率的零模电压,实质上是通过注入极间电压,再通过接地故障下电路的不对称特征耦合实现的。注入极间电压激励的方法如图2所示。

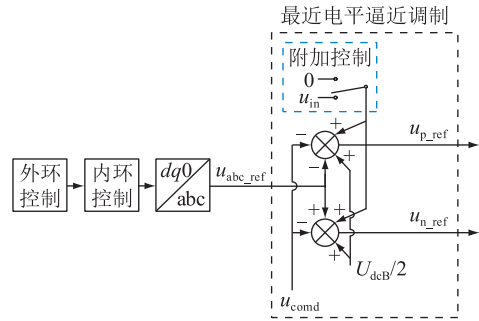


图2 含信号注入的附加控制框图
Fig.2 Additional control block diagram with signal injection

图2中,MMC控制器通过外环功率控制和内环电流控制得到参考量,再通过派克反变换,即得到abc三相坐标系下的差模电压参考值 u_{abc_ref} 。共模电压参考值 u_{cmd} 通过环流抑制控制得到。 u_{p_ref} 、 u_{n_ref} 分别为MMC上下桥臂子模块参考电压值; U_{dc} 为直流极间电压; u_{in} 为 \dot{U}_{in} 的瞬时值。

在稳态情况下,MMC的直流侧电压为:

$$u_{dc} = u_{p_ref} + u_{n_ref} = U_{dcB} + 2u_{in} - 2u_{cmd} \quad (3)$$

其中,MMC控制器的附加控制函数为:

$$u_{in} = k_{in} \sin(\omega_{in} t + \varphi_{in}) \quad (4)$$

式中: k_{in} 为探测信号注入系数,其决定了注入信号的幅值; ω_{in} 为注入探测信号的角频率; t 为时间; φ_{in} 为注入探测信号的初相位。

1.2 探测信号参数选取

1.2.1 频率

探测信号频率的选择主要考虑设备控制能力的约束,并最大化响应特征的差异,提高检测的灵敏度。

一方面,换流器的运行和控制能力,限制了注入信号的能力,文献[17]在对MMC进行简化建模的基础上,得到MMC开环时间常数为:

$$T \approx \left(1 + \frac{1}{\omega^2} \right) \times \frac{8\omega^2 L_s^2 C}{NR_L} \quad (5)$$

式中： ω 为基波频率； L_s 为 MMC 桥臂电感； C 、 N 、 R_L 分别为 MMC 子模块的电容、个数及等效损耗电阻。

在式(5)的约束下，根据 ± 10 kV 柔性直流配电网及 MMC 典型参数，估算换流器产生的控制信号频率一般不应超过 300 Hz。另一方面，随着信号频率升高，线路对信号的衰减作用加强，因此为保证良好的注入特性，频率的设置不应过高。综上所述，探测信号频率设置在 100~200 Hz 较为合适，文中频率设置为 120 Hz。

1.2.2 幅值

探测信号幅值的选择主要考虑互感器测量精度以及探测信号注入对电网的冲击两方面。

一方面，直流配电网中互感器的精度为 0.5%，探测信号的幅值应大于该限值。另一方面，根据国家标准的要求，系统运行时的电压波动偏差范围应在 5% 以内^[18]。综合考虑，文中选取探测信号的幅值为额定直流电压的 2%，以同时满足互感器精度和电网正常运行的要求。

1.2.3 时长

注入探测信号的时长选择一方面要满足探测信号的注入能被有效识别和提取，另一方面要减小注入时长，以降低其对电网正常运行的影响。文中选择注入探测信号时长 t_{in} 为 50 ms。

同时，为保证探测信号稳定注入，需要延时 Δt 超过 10 ms，文中选择延时 20 ms。

1.3 响应信号分析

借助凯伦鲍尔极模变换对极电路进行解耦，得到图 1 对应的故障零模等效电路，如图 3 所示。

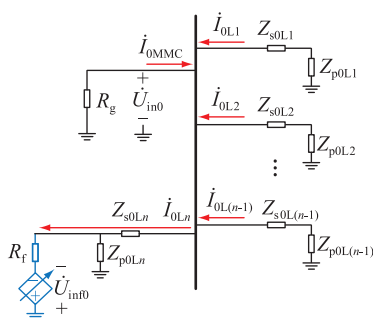


图 3 故障零模等效电路

Fig.3 Fault zero-mode equivalent circuit

图 3 中， Z_{s0Lk} 为第 k 条馈线的零模串联阻抗，且有 $Z_{s0Lk} = \sqrt{2}Z_{sLk}$ ； Z_{p0Lk} 为第 k 条馈线的零模对地支路阻抗，且有 $Z_{p0Lk} = \sqrt{2}Z_{pLk}$ ； \dot{U}_{in0} 为根据边界条件得出的等效在故障支路的零模电源； \dot{i}_{0Lk} 为第 k 条馈线首端的零模电流计算值； \dot{i}_{0Ln} 为故障馈线 n 首端的零模电流计算值； \dot{i}_{0MMC} 为 MMC 首端的零模电

流计算值。

由图 3 可知，计算的零模电流由故障馈线流出，由健全馈线和 MMC 的接地支路流入。

对于健全馈线，有：

$$\dot{i}_{0Lk} = \frac{\dot{U}_{in0}}{Z_{s0Lk} + Z_{p0Lk}} \quad (6)$$

对于故障馈线，有：

$$\dot{i}_{0Ln} = \sum_{k=1}^{n-1} \dot{i}_{0Lk} + \dot{i}_{0MMC} \quad (7)$$

由式(6)可知，以母线零模电压 \dot{U}_{in0} 的相位为参考相位，健全馈线首端计算零模电流相位为线路零模串联阻抗和零模对地支路阻抗之和的阻抗角，因而各条健全馈线计算零模电流相位相同。考虑到 MMC 接地支路零模电流 \dot{i}_{0MMC} 远小于各条馈线的计算零模电流，因此由式(7)可知，故障馈线与健全馈线的计算零模电流相位相反。

据此，根据各条健全馈线首端计算零模电流相位相同，而其与故障馈线首端计算零模电流相位相反的特征，完成接地故障选线。

2 基于信号注入后响应特征的选线方案

2.1 选线原理

从对响应信号的分析可得，单极接地故障支路破坏了原直流配电网的对称性，使得从健全馈线首端测得的零模电流方向与从故障馈线首端测得的零模电流方向相反。即零模故障电流从各条健全馈线流出，并流入故障馈线，因此可根据这一差异识别故障馈线。

首先对各条馈线的电流进行归一化处理。采集第 k 条馈线首端的正负极电流 i_{Pk} 、 i_{Nk} ，用于识别故障馈线。采用带通滤波器对测量得到的馈线电流进行滤波，设置 ω_{in} 为探测信号的特定频率，则滤波后第 k 条馈线首端的正负极电流为 $i_{Pk}(\omega_{in})$ 、 $i_{Nk}(\omega_{in})$ 。随后，对滤波后的电流时域信号采用 K 变换求取各馈线零模分量。

$$i_{0k} = \frac{\sqrt{2}}{2}(i_{Pk}(\omega_{in}) + i_{Nk}(\omega_{in})) \quad (8)$$

式中： i_{0k} 为 1 个计算数据窗长内由第 k 条馈线首端看入的零模电流值。

再对各馈线零模电流进行归一化处理，以便后续识别故障馈线。

$$i_{0k}^* = i_{0k}/I_{0k} \quad (9)$$

式中： i_{0k}^* 为归一化的 1 个计算数据窗长内由第 k 条馈线首端看入的零模电流值； I_{0k} 为 1 个计算数据窗

长内由第 k 条馈线首端看入的零模电流幅值。

考虑到识别电流方向需要首先规定正方向,因此根据各馈线归一化零模电流,进一步计算馈线零模电流参考值。即利用各馈线归一化零模电流相加后,再进行归一化处理。

$$i_L = \sum_{k=1}^n i_{0k}^* \quad (10)$$

$$i_L^* = i_L / I_L \quad (11)$$

式中: i_L 为1个计算数据窗长内总的馈线零模电流参考值; I_L 为1个计算数据窗长内总的馈线零模电流参考值的幅值; i_L^* 为归一化的1个计算数据窗长内馈线零模电流参考值。

随后,引入皮尔森相关性系数^[19-21],依次求取各馈线归一化零模电流与馈线零模电流参考值的皮尔森波形相关性系数,依据该系数进行故障判别,确定故障馈线和健全馈线。

$$\rho_k = \rho(i_{0k}^*, i_L^*) = \frac{D(i_{0k}^*, i_L^*)}{\sigma(i_{0k}^*)\sigma(i_L^*)} \quad (12)$$

式中: ρ_k 为1个计算数据窗长内第 k 条馈线首端的归一化零模电流和归一化馈线零模电流参考值的皮尔森波形相关性系数; $D(i_{0k}^*, i_L^*)$ 为电流 i_{0k}^* 和 i_L^* 之间的协方差; $\sigma(i_{0k}^*)$ 、 $\sigma(i_L^*)$ 分别为电流 i_{0k}^* 和 i_L^* 的标准差。

2.2 启动判据

在发生单极接地故障时,电路受到故障支路的影响,故障极对地电压跌落至0,健全极对地电压绝对值上升至极间额定电压,正负极对地电压出现明显不平衡^[22-23]。因此可利用直流极间电压不平衡度启动主动注入策略和后续故障判别。电压不平衡度判据具体为:

$$|u_{dcP} + u_{dcN}| > 0.1U_{dcN} \quad (13)$$

式中: u_{dcP} 、 u_{dcN} 分别为正负极直流母线对地电压幅值; U_{dcN} 为直流额定电压。

2.3 选线识别判据

基于皮尔森相关性系数分辨各条馈线零模电流的波形,分别计算归一化后的各馈线零模电流值与馈线零模电流参考值的皮尔森波形相关性系数。基于选线原理可知,健全馈线的相关性系数接近于1,故障馈线的相关性系数接近于-1。在实际选线过程中,受电网电容、电感影响,注入的探测信号中可能叠加有直流量、谐波、噪声、衰减直流分量等干扰项。虽然皮尔森相关性系数在应用时并不能完全消除以上所有干扰项的影响,但仍能保证计算结果的稳定性。

考虑检测和计算裕度,若计算得到的两电流呈

正强相关,则选线结果为非故障,若呈负强相关,则选线结果为故障。若所有馈线计算结果均为正强相关,则进一步凭借电压不平衡判据判断是否为母线故障。具体选线识别判据为:

$$\rho_k = \rho(i_{0k}^*, i_L^*) < \varepsilon_{set} \quad (14)$$

式中: ε_{set} 为可靠系数,文中取-0.5。

2.4 选线流程

基于注入信号及其响应信号相关性的直流配电网接地故障选线流程如图4所示。

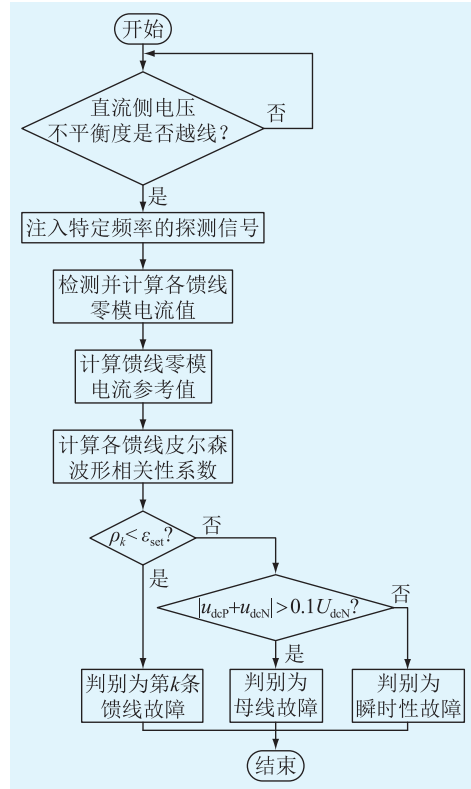


图4 直流配电网接地故障选线流程

Fig.4 Grounding fault line selection process of DC distribution network

当检测到直流侧电压不平衡度越限后,启动故障选线策略,并将含信号注入的控制策略附加于MMC,实现探测信号注入。

探测信号注入后,等待20 ms以过渡到注入信号稳定后再进行识别。检测并计算各馈线归一化零模电流值与馈线零模电流参考值,进一步得到其皮尔森波形相关性系数。若第 k 条馈线满足保护动作判据,则选线结果为故障馈线。若所有线路计算的皮尔森波形相关性系数均大于阈值,则考虑增加注入信号的强度后再次进行识别。若识别次数达到预置的次数上限 n_{set} ,仍识别为无故障,则此时再通过直流侧电压不平衡判据进行识别。若此时直流侧电压不平衡度仍大于阈值,则识别为母线故障;反之,识别为瞬时性故障。文中 n_{set} 取2。

3 仿真结果

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建±10 kV 直流配电网模型^[24-27],如图 5 所示。图 5 中,配电网直流母线电压为±10 kV,MMC 外环控制策略采用定直流电压控制和定无功功率控制。综合考虑负荷、分布式能源,对基于注入信号及其响应信号相关性的直流配电网接地故障选线进行验证,文中构建了含有 4 条馈线的辐射状直流配电网模型。其中, S_1 (4 MW)模拟相对长距离恒功率负荷;线路 L_2 模拟光伏(PV)发电经过 DC/DC 变换器并网,且自身带 S_2 (800 Ω) 的恒定电阻负荷; S_3 (267 Ω) 模拟恒定电阻负荷; S_4 (1 MW)模拟相对短距离恒功率负荷。

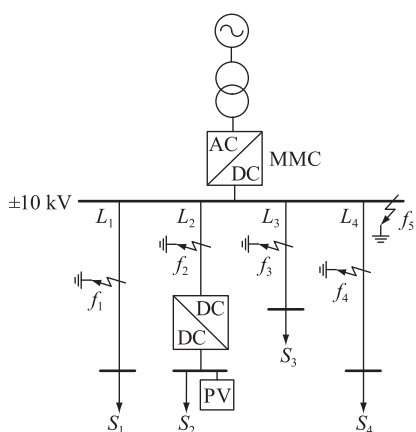


图 5 ±10 kV 辐射型柔性直流配电网模型
Fig.5 ±10 kV radiating flexible DC distribution network model

3.1 注入效果验证

对基于注入信号及其响应信号相关性的直流配电网接地故障选线效果进行验证,文中首先对注入效果进行验证,如图 6 所示。图中, u_{dcj} 为叠加注入信号后的极间电压; u_0 为 \dot{U}_{in0} 的瞬时值形式。

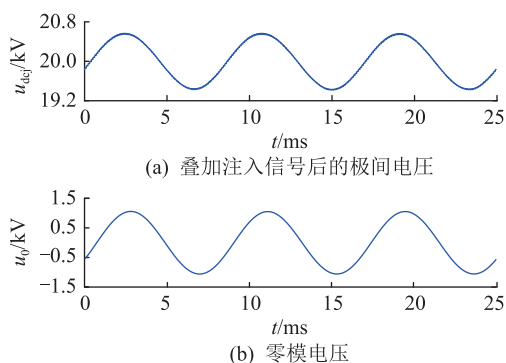


图 6 注入效果波形

Fig.6 Injection effect waveforms

由图 6 可知,文中注入的是幅值可控的极间电压,即间接注入了零模电压。

3.2 选线性能验证

设置馈线 L_1 末端发生负极金属性接地故障,仿真结果如图 7 所示。

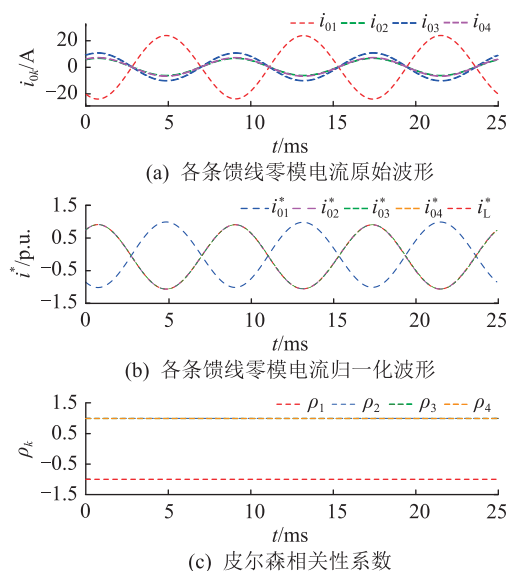


图 7 馈线末端负极金属性接地故障仿真结果
Fig.7 Simulation results of negative metallic grounding fault at the end of feeder

由图 7(a)可知,发生故障时,注入的特征频率正弦信号上叠加了一衰减直流量,该分量大小与系统规模、过渡电阻、故障位置等相关。而图 7(c)表明,引入电流相关性判据,一定程度上能够克服其影响,稳定反映故障馈线与健全馈线零模电流的差异。

设置馈线 L_3 首端发生正极金属性接地故障,仿真结果如图 8 所示。

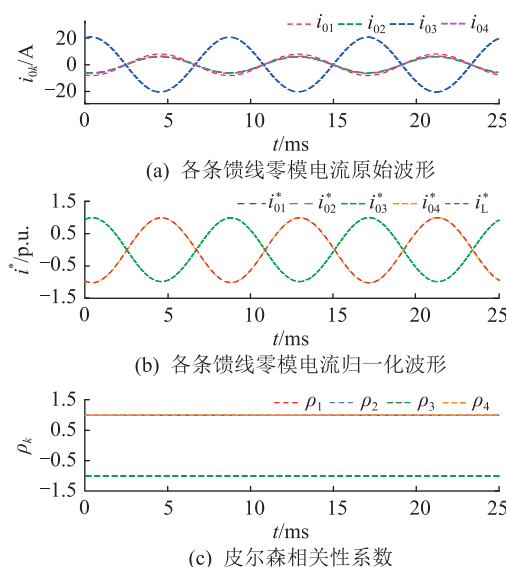


图 8 馈线首端正极金属性接地故障仿真结果
Fig.8 Simulation results of positive metallic grounding fault at the head of feeder

由图 8 可知,主动注入特征信号后,故障馈线与健全馈线零模电流存在截然相反故障方向特征,通过归一化处理后,该特征更为明显。故障馈线对应的皮尔森相关性系数也呈现出负值特性,能够可靠选出故障馈线。

设置直流母线发生正极金属性接地故障,仿真结果见图 9。由图 9 可知,直流母线发生故障时,所有馈线的皮尔森相关性系数均在 1 附近,再进一步依据电压不平衡判据即可识别出该故障为母线故障。

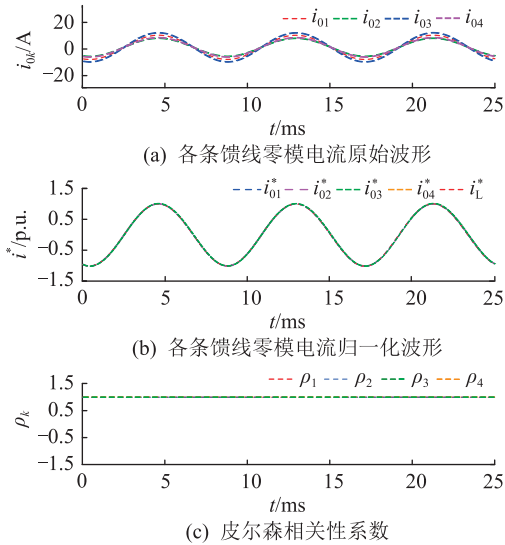


图 9 直流母线故障仿真结果

Fig.9 Simulation results of DC bus fault

其余不同位置发生单极接地故障时的判别结果见表 1。

表 1 馈线故障仿真结果

Table 1 Simulation results of feeder fault

故障位置	故障极	皮尔森相关性系数				选线结果
		ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	
L_1 首端	正极	-1.000	0.989	0.999	0.997	L_1
L_1 中间	正极	-0.999	0.998	0.999	0.997	L_1
L_1 中间	负极	-0.999	1.000	0.999	0.998	L_1
L_1 末端	负极	-0.998	1.000	0.997	1.000	L_1
L_2 首端	负极	0.996	-1.000	0.999	1.000	L_2
L_2 中间	负极	0.997	-0.998	0.999	0.988	L_2
L_2 中间	正极	0.997	-0.998	1.000	0.989	L_2
L_2 末端	正极	0.998	-0.999	1.000	1.000	L_2
L_3 首端	正极	0.999	1.000	-1.000	0.995	L_3
L_3 中间	正极	0.988	0.999	-1.000	0.995	L_3
L_3 中间	负极	0.988	0.999	-1.000	0.996	L_3
L_3 末端	负极	1.000	1.000	-0.997	1.000	L_3
L_4 首端	负极	1.000	0.999	0.989	-0.989	L_4
L_4 中间	负极	0.998	0.999	1.000	-0.997	L_4
L_4 中间	正极	1.000	0.999	1.000	-0.998	L_4
L_4 末端	正极	0.999	1.000	1.000	-1.000	L_4

由表 1 可知,文中基于注入信号及其响应信号相关性的直流配电网接地故障选线方法能够可靠识别故障馈线。

3.3 耐过渡电阻性能验证

由响应信号分析的式(6)、式(7)可知,所利用的故障特征和设计的选线判据理论上与过渡电阻无关。但随着过渡电阻增大,故障暂态过程变长,系统中的衰减直流分量影响保护判据的计算结果。

设置馈线 L_1 末端发生负极接地故障,设置故障支路过渡电阻分别为 100、150、200、250、300、1 000、2 000 Ω ,对文中方法的耐过渡电阻能力进行验证。其中,过渡电阻为 300 Ω 和 2 000 Ω 时的仿真结果分别如图 10、图 11 所示。

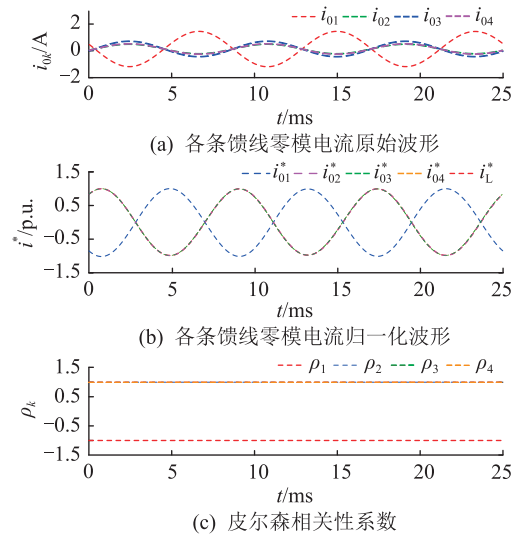


图 10 馈线末端经 300 Ω 过渡电阻接地故障仿真结果

Fig.10 Simulation results of feeder terminal grounding fault with transition resistance of 300 Ω

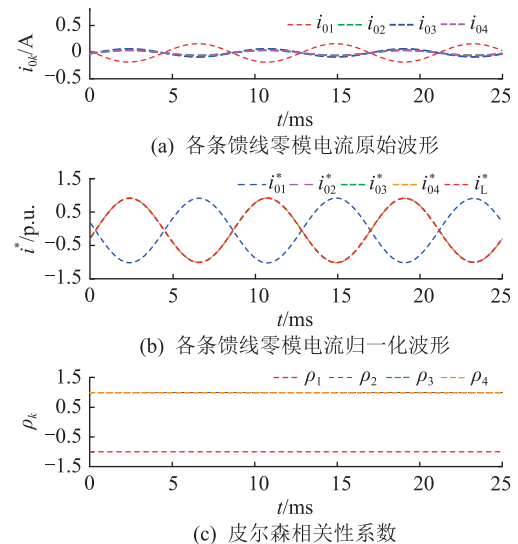


图 11 馈线末端经 2 000 Ω 过渡电阻接地故障仿真结果

Fig.11 Simulation results of feeder terminal grounding fault with transition resistance of 2 000 Ω

此外,馈线 L_1 末端发生不同过渡电阻接地故障时的判别结果如表 2 所示。由表 2 可知,文中方法可以准确选线。

表 2 L_1 末端经不同过渡电阻接地故障仿真结果
Table 2 Simulation results of L_1 terminal grounding fault with different transition resistances

过渡电阻/ Ω	皮尔森相关性系数				选线结果
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	
100	-1.000	1.000	1.000	0.999	L_1
150	-0.989	0.998	1.000	1.000	L_1
200	-0.999	1.000	0.999	0.997	L_1
250	-0.999	0.997	0.999	0.997	L_1
300	-0.995	1.000	0.989	0.997	L_1
1 000	-0.990	1.000	0.984	0.990	L_1
2 000	-0.991	0.998	0.999	0.991	L_1

3.4 抗噪性能分析

以线路 L_1 末端发生负极金属性接地故障为例,在测量信号上添加高斯白噪声,仿真结果如图 12 所示。由图 12 可知,在信噪比为 20 dB 的噪声干扰下,文中方法仍能可靠识别故障馈线。

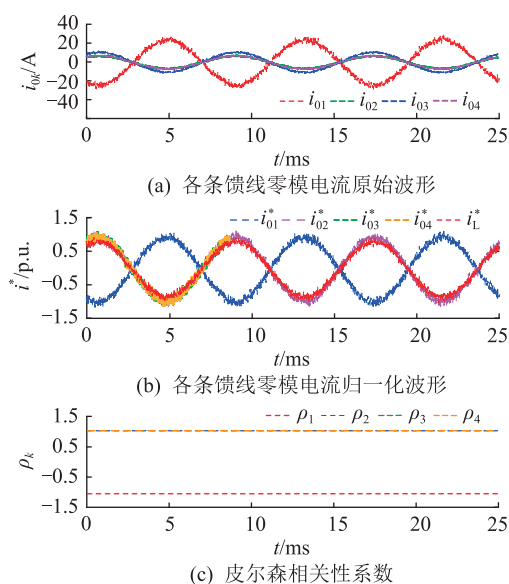


图 12 抗噪性能仿真结果

Fig.12 Simulation results of anti-interference performance

4 结论

文中提出一种直流配电网单极接地故障选线方法,结论如下。

(1) 故障后利用 MMC 共模附加控制产生特定频率的极间电压,借助故障电路的不对称性,可以实现零模电压的间接注入。

(2) 电网存在如下故障特征:故障馈线零模电

流由母线流入馈线,而健全馈线零模电流由馈线流出,可据此设计选线判据。

仿真结果验证了文中所提方法的有效性,该方法能够可靠识别发生在母线或各条馈线任意位置的单极接地故障,并具备一定的耐过渡电阻能力。

致 谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021043)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 李卫丰,王超,薛永端,等. 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(23):1-10.
LI Weifeng, WANG Chao, XUE Yongduan, et al. Single-pole grounding protection method for flexible DC distribution network lines based on transient power direction[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(23):1-10.

[2] 全少理,郭勇,杨卓,等. 基于灵敏度分析的交直流配电网无功补偿策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021,36(5):104-112.
QUAN Shaoli, GUO Yong, YANG Zhuo, et al. Reactive power compensation strategy for AC/DC hybrid distribution network based on the sensitivity analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021,36(5):104-112.

[3] 左鹏飞,秦文萍,夏福良,等. 基于零模电流相关性的直流配电网单极接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(13):86-97.
ZUO Pengfei, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Single-pole ground selection method for DC distribution networks based on zero-mode current correlation[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(13):86-97.

[4] 杨欢红,朱子叶,黄文焘,等. 基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022,50(16):66-75.
YANG Huanhong, ZHU Ziyue, HUANG Wentao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method[J]. Power System Protection and Control, 2022,50(16):66-75.

[5] 耿世平,余敏,郭晓鹏,等. 基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估[J]. 电力科学与技术学报, 2022,37(1):140-150.
GENG Shiping, YU Min, GUO Xiaopeng, et al. Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(1):140-150.

[6] 王成. 直流配电网故障分析及保护方案研究[D]. 太原:太原理工大学, 2019.
WANG Cheng. Fault analysis and protection scheme research of DC distribution network[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[7] 王晓卫,高杰,吴磊,等. 柔性直流配电网高阻接地故障检测

- 方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2806-2819.
- WANG Xiaowei, GAO Jie, WU Lei, et al. A high impedance fault detection method for flexible DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(13): 2806-2819.
- [8] 余修勇, 肖立业. 直流配电网故障识别和定位技术研究综述[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(7): 56-66.
- YU Xiuyong, XIAO Liye. An overview of fault identification and location technology for DC distribution networks[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(7): 56-66.
- [9] 朱承治, 郑伟彦, 夏晓春, 等. 基于暂态相电流频率特性的配电网单相接地故障选线方法[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(6): 16-22.
- ZHU Chengzhi, ZHENG Weiyan, XIA Xiaochun, et al. Single-phase grounding fault line selection in distribution network based on frequency characteristics of transient phase current[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2021, 39(6): 16-22.
- [10] LIU P H, DU S T, SUN K, et al. Single-line-to-ground fault feeder selection considering device polarity reverse installation in resonant grounding system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(4): 2204-2212.
- [11] 谈竹奎, 徐玉韬, 吕黔苏, 等. 利用电容主动放电脉冲的直流配电网故障选线方法[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 139-146.
- TAN Zhukui, XU Yutao, LYU Qiansu, et al. Faulted line selection method for DC power distribution network by using active capacitance discharge pulse[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 139-146.
- [12] 张希鹏, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于 VPC-EMTR 理论的直流配电网故障选线[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1729-1739.
- ZHANG Xipeng, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault line selection in DC distribution network based on VPC-EMTR theory[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1729-1739.
- [13] GODA Y, MATSUDA S, INABA T, et al. Insulation recovery time after fault arc interruption for rapid auto-reclosing on UHV (1 000 kV class) transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1060-1065.
- [14] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173-183.
- SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183.
- [15] 徐瑞东, 常仲学, 宋国兵, 等. 注入探测信号的直流配电网接地故障识别方法[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4269-4277.
- XU Ruidong, CHANG Zhongxue, SONG Guobing, et al. Grounding fault identification method for DC distribution network based on detection signal injection[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4269-4277.
- [16] 蔡普成, 向往, 周猛, 等. 基于混合型 MMC 主动信号注入的直流故障自适应重合闸方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3867-3878.
- CAI Pucheng, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on adaptive reclosing of DC fault based on active signal injected by hybrid MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3867-3878.
- [17] 刘栋, 汤广福, 郑健超, 等. 模块化多电平换流器小信号模型及开环响应时间常数分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 1-8.
- LIU Dong, TANG Guangfu, ZHENG Jianchao, et al. Small signal modeling and analysis of open-loop response time constant of MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 1-8.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 中低压直流配电电压导则: GB/T 35727—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Guideline for standard voltages of medium and low voltage DC distribution system: GB/T 35727-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [19] 朱余启, 陈汝昌, 戈本星, 等. 基于波形统计分析的频率振荡相关机组快速识别技术[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 54-60.
- ZHU Yuqi, CHEN Ruchang, GE Benxing, et al. Fast identification technology for frequency oscillation and associated units based on waveform statistic analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 54-60.
- [20] 马瑞, 周谢, 彭舟, 等. 考虑气温因素的负荷特性统计指标关联特征数据挖掘[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 43-51.
- MA Rui, ZHOU Xie, PENG Zhou, et al. Data mining on correlation feature of load characteristics statistical indexes considering temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 43-51.
- [21] 杨帆, 冯翔, 阮羚, 等. 基于皮尔逊相关系数法的水树枝与超低频介损的相关性研究[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 21-25, 31.
- YANG Fan, FENG Xiang, RUAN Ling, et al. Correlation study of water tree and VLF tan δ based on Pearson correlation coefficient[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 21-25, 31.
- [22] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述[J]. 供用电, 2018, 35(6): 3-11.
- LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 3-11.
- [23] 李猛. 柔性直流配电网保护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- LI Meng. Research on protection of flexible DC distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

ty, 2018.

[24] 吴在军, 谢兴峰, 杨景刚, 等. 直流配电网电压控制技术综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 59-67.
WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. Summary of voltage control technology in DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67.

[25] 张桂红, 王琛, 张祥成, 等. 一种适用于直流配电网中半桥-全桥混合型 MMC 的全电平逼近调制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 75-83.
ZHANG Guihong, WANG Chen, ZHANG Xiangcheng, et al. A full-level modulation strategy for half bridge-full bridge hybrid MMC in DC distribution grids[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 75-83.

[26] 张伟, 方永丽, 孙硕, 等. 基于多重综合判据的单端 MMC 直流配电网单极接地保护方法[J]. 广东电力, 2022, 35(5): 53-59.
ZHANG Wei, FANG Yongli, SUN Shuo, et al. Single pole

grounding protection method for single-ended MMC DC distribution network based on multiple comprehensive criteria[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(5): 53-59.

[27] 李家旭, 夏华, 包向宇. 含分布式电源接入的直流配电网故障仿真[J]. 电器与能效管理技术, 2022(4): 76-82.
LI Jiaxu, XIA Hua, BAO Xiangyu. Fault simulation of DC distribution network with distributed power supply access[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(4): 76-82.

作者简介:



王晨清

王晨清(1987), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护与控制工作(E-mail: we-qmorning@163.com);

陈实(1990), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护与控制工作;

齐贝贝(1993), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统继电保护与控制工作。

An active grounding fault line selection method for DC distribution network based on waveform correlation

WANG Chenqing, CHEN Shi, QI Beibei, KONG Xiangping, LI Peng, GAO Lei

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The fault characteristics of direct current (DC) distribution network with small current grounding mode are inconspicuous when single-pole grounding fault occurs. In order to accurately and reliably select the fault line, a grounding fault selection method based on the injected signal waveform correlation is proposed. Firstly, a predesigned additional control strategy is applied to the modular multilevel converter (MMC) of the DC distribution network to achieve the detection signal injection. Then, in combination with the zero-mode network, the fault characteristics are as follows. The specific frequency zero-mode current flow at the beginning of each sound feeder are same, which are opposite to zero-mode current flow at the beginning of the faulty feeder. Finally, based on this fault characteristic, the fault selection criterion is designed, and the Pearson correlation coefficient is introduced to compare the correlation between the normalized zero-mode current of each feeder and the total normalized zero-mode current. The fault selection is completed based on the characteristics that the correlation coefficient of the sound feeder is close to 1 and the correlation coefficient of the faulty feeder is close to -1. The simulation results show that the proposed method can reliably identify single-pole grounding fault occurring at any location on the bus or each feeder under high-resistance grounding fault.

Keywords: direct current (DC) distribution network; modular multilevel convert (MMC); line selection of small current grounding fault; injected signal; zero-mode network; normalized current; Pearson correlation coefficient

(编辑 吴楠)