

架空柔性直流电网线路故障保护综述

杨赛昭, 向往*, 文劲宇

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Review of DC Fault Protection Methods for the MMC Based DC Grid

YANG Saizhao, XIANG Wang*, WEN Jinyu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: This paper systematically analyzed the key technical issues of DC line protection methods for the overhead MMC based DC grids. Firstly, the technical requirements of the DC grid line protection were presented. Then, the fault characteristics of DC grids were analyzed and the protection methods between MMC based DC grids and other systems were compared. Further, various protection methods dedicated for the MMC based DC grids were surveyed. In addition, the main protection and backup protection were introduced. Finally, the performance of typical protection methods was validated and compared by extensive simulations in PSCAD/EMTDC.

KEY WORDS: overhead MMC based DC grid; line protection; fault characteristics; main protection; backup protection.

摘要:该文系统地综述架空柔直电网线路保护的关键技术问题。首先,阐述柔直电网线路保护的技术需求,并与其他系统的故障保护进行对比;然后,从理论上分析短路故障的故障特性,并对比总结常用的故障保护方法。进一步地,介绍主保护和后备保护的相关问题。最后,在PSCAD/EMTDC中搭建四端柔直电网模型,对不同类型的保护方案进行仿真对比。

关键词: 架空柔直电网; 线路保护; 故障特性; 主保护; 后备保护

0 引言

随着化石能源的逐渐枯竭和环境压力的日益增加,各国都开始进行能源结构的调整和大规模清洁能源的开发^[1]。在国家发改委和国家能源局印发的《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》中明确提到:从长期来看,展望2050年,能源消费总量基本稳定,非化石能源占比超过一半,成为全球能源治理重要参与者。

然而,风能、太阳能等清洁能源具有间歇性和随机性特点,加之本地交流系统对新能源的消纳能力有限,这使得弃风、弃光现象经常出现^[2-3]。同时,我国清洁能源基地与负荷需求呈逆向分布,大规模新能源的远距离并网和资源的优化配置成为亟待解决的问题^[4-5]。采用基于电压源型换流器的直流输电技术是大规模清洁能源基地接入电网的有效方案^[6-8]。

从运行灵活性与供电可靠性角度出发,多电源供电和多落点受电的柔性直流电网技术成为未来智能电网的发展趋势^[9-10]。目前国家电网公司正在建设张北四端±500kV柔性直流电网示范工程,该工程综合了风、光、储等综合能源,是目前世界上第一个柔性直流电网工程^[11]。

考虑到输电距离、电压等级以成本问题,架空线路输电是大规模功率传输的主要方式之一^[7]。架空线路工作环境恶劣,故障发生概率很高,需要可靠的保护技术进行故障隔离^[12]。由于直流电网是低惯性网络,直流侧一旦发生短路故障,各换流站立即向故障点馈入短路电流,这使得故障电流上升速度快、幅值大,给换流站和系统安全运行造成危害^[13]。考虑到绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)承受短路电流能力有限,当桥臂电流大于保护阈值时,换流站需采取闭锁措施。尽管桥臂闭锁,交流电源依然向故障点馈入短路电流,并不能够实现故障电流的清除。

为应对架空柔直电网直流故障问题,国内外学者进行了大量研究。文献^[14]利用换流器闭锁实现直流故障电流的清除,但闭锁换流站降低了供电可靠性,仅适用于点对点直流输电应用场合^[14]。目前主流的故障应对方法是采用基于高压直流断路器

基金项目:国家自然科学基金项目(U1766211, 51807071)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1766211, 51807071).

的故障隔离技术。该方法依靠超快速检测方法与断路器配合，实现故障区域的快速隔离，保证非故障区域正常运行。以张北工程为例，架空线路两侧通过配置高压直流断路器来进行故障隔离。

针对基于高压直流断路器的架空柔直电网故障保护研究，本文系统地对其关键问题进行归纳分析，并对不同保护方案进行仿真比较。本文分为以下几个部分：首先，介绍柔直电网保护的技术要求，并对比分析柔直电网与其他系统故障保护的差异性，从而为保护方案的设计与保护性能的评价提供依据；然后，对故障特性以及常用故障保护方法优缺点、适用场景进行了总结对比，为故障保护方案的优化以及新保护算法的获取提供思路。进一步地，介绍主保护和后备保护的相关问题；最后，在 PSCAD/EMTDC 中搭建四端柔直电网模型，对不同类型的保护方案进行仿真对比，分析它们性能的差异；并在结论中指出故障保护研究的新趋势。

1 架空柔直电网保护的技术要求与特殊性

1.1 架空柔直电网拓扑与保护配置

图 1 为四端 MMC 直流电网拓扑，其子模块采用半桥型结构。由于半桥型 MMC 不具备故障自清除能力，因此在线路两侧安装开断速度快、通态损耗小的混合式高压直流断路器来进行故障隔离^[19]。为限制故障电流的上升速度，线路两侧还需安装限流电抗器。

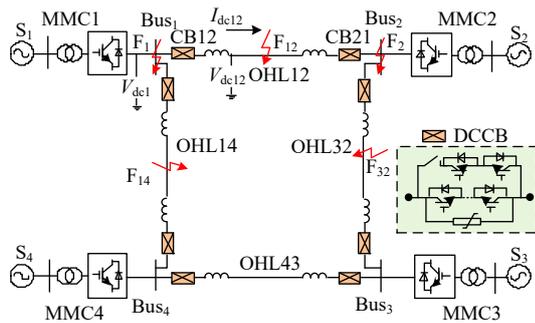


图 1 四端 MMC 直流电网模型

Fig. 1 The model of the four-terminal DC grid

对于图 1 所示的架空柔性直流电网，其继电保护分区可按照图 2 所示进行配置，即交流保护分区、换流站保护分区和直流保护分区。

其中，交流保护分区配置发展较为成熟；换流站运行环境好，故障发生概率低；而直流保护分区跨度大，且架空线路运行环境恶劣，故障发生概率高，加之故障电流切除困难，故至今还没有形成一套完备的保护体系，因此直流线路保护成为继电保护的研究热点。

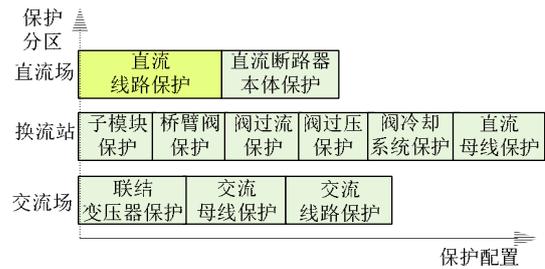


图 2 保护分区与保护配置

Fig. 2 The protection zone and protection configuration

1.2 架空柔直电网保护的技术要求

1.2.1 速动性

柔性直流电网阻尼小，对功率扰动的响应速度快^[13]，因此直流线路发生短路故障时，故障电流上升速度快、幅值大。若不及时地清除故障电流，将导致功率半导体器件被烧毁，危害系统安全运行。以张北工程为例，故障清除时间要求在 6ms 以内，而混合式 DCCB 的动作时间为 3ms 左右，这意味着保护出口时间要小于 3ms^[20]。

为实现速动性这一技术要求，应具备以下几个条件。首先，在检测环节应尽可能使用单端测量量，避免纵联保护的通讯延时；其次，在数据处理环节所涉及的算法不应过于复杂，否则会加重硬件处理器的计算负担和计算时间，文献[21]采用内存为 4GB 的 I5 Intel 核处理器去分别计算短时傅里叶变换与 4 尺度下的小波变换，每个采样点所花销的计算时间依次为 24.27 μ s 与 41.25 μ s，故应选择简单可行的保护算法来减少时间花销；最后，在构造判据环节应减小数据时间窗的大小，数据时间窗越长，越有利于提取特征量，相应地会牺牲速动性。

1.2.2 选择性

选择性是指继电保护动作时，应在可能最小的范围内将故障元件从电力系统中切除，尽量缩小停电范围，最大限度保证系统非故障部分正常运行。

如图 1 所示，记保护 CB12 和 CB21 为线路 OHL12 的主保护，当发生 F₁₂ 故障时，保护 CB12 和 CB21 应快速动作，并断开相应的断路器。同理 F₁、F₂、F₁₄ 等故障为区外故障，保护不应动作。通过保护选择性动作，可以实现故障区域的隔离与非故障部分正常运行，从而提高供电可靠性与运行安全性。

大多数保护算法能够在低阻故障下满足选择性的要求。这些方法通过抬高整定值来躲区外故障，然而降低了对高阻故障的灵敏性。纵联保护可弥补高阻故障选择性不足的缺点，但需采集对侧的数据，增加了保护延时，故常用作后备保护。方向元件可以识别反方向故障，但不能保证正方向故障

的选择性。

1.2.3 灵敏性

灵敏性强调保护方案对区内故障的反应能力,其受短路类型和故障电阻的影响。

为提高保护方法对不同短路类型的适用性,常常增加故障选极判据,即先划分故障类型,再进行故障识别。特别地,针对真双极运行系统,发生单极故障时,故障极退出运行后,健全极仍可正常工作。因此,故障选极不仅能够提高对故障类型的灵敏性,还可以提高供电可靠性。

对高阻故障的反应能力是评价一个保护方法性能优劣的重要指标。基于时域变化量、变化率的保护方法,对高阻故障灵敏性差。尤其当输电线路较长时,线路的衰减作用明显,此时区内远距离高阻故障的特征量与区外金属性故障的特征量接近,保护会拒动。以云广特高压输电工程为例,其保护方案采用西门子的行波保护,当接地电阻大于100Ω时,该保护会拒动^[22-24]。基于频域的保护方法,耐受过渡电阻的能力有所提高。究其本质,故障的频域特性受故障电阻影响小。电压与电流作为保护算法中最常见的两类测量电气量。与电压测量量相比,电流测量量的幅值受故障电阻影响大。

采样频率是影响灵敏性的另一因素。采样频率越高,数据量越大,故障信息越丰富^[20]。在一定时间窗口内,为满足灵敏性的要求,需要使用较高的采样频率。随着性能优异的模数转换器和数字信号处理器的不断开发,目前故障测距系统的最小采样步长可达1μs,这间接证明了小步长采样应用于故障检测的可行性^[25]。

1.2.4 可靠性

可靠性要求保护在区外故障时不误动、在区内故障时不拒动。影响可靠性的主要因素有:噪声干扰与雷击干扰。

噪声信号是设备或系统内部产生的一种干扰源,常用信噪比(signal noise ratio, SNR)表示正常信号与噪声信号的大小关系,其定义如下:

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_s}{P_{\text{noise}}} \text{ (db)} \quad (1)$$

式中 P_s 、 P_{noise} 分别表示正常信号与噪声信号功率。图3为信噪比为20db时,所测得线路侧直流电压 $V_{\text{dc}12}$ 的波形图。

由图3可知,信噪比为20db时,原始电压信号会被噪声信号所淹没,对电压变化率和电压变化量的测量带来不利影响。

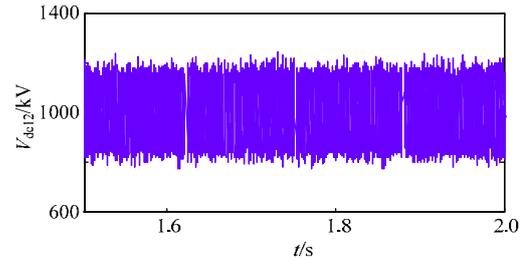


图3 信噪比为20db时直流电压波形图

Fig. 3 The DC voltage waveforms when the SNR is 20db
雷击是另一种常见的干扰源,其表达式如下:

$$I_0 = -I_m \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \quad (2)$$

式中: T_1 、 T_2 分别指的是雷电流的波头时间与波尾时间。标准雷击电流波形的波头和波尾时间分别为1.2μs/50μs。雷电流具有幅值大,持续时间短的特点,这将会给电压电流带来较大的暂态分量,可能会造成保护误动。

噪声信号与雷击干扰信号都属于高频信号,其能量集中在高频段,低频含量少。与区内外故障相比,噪声和雷击干扰具有明显的频域差异性,如表1所示。

表1 故障和干扰的频域差异性

Tab. 1 The differences between fault and disturbance

信号类型	高频分量	低频分量
噪声和雷击干扰	大	小
区外故障	小	大
区内故障	大	较大

由表1可知,利用频域差异性可以构造防噪声和雷击干扰的判据,如:比较低频能量的大小或利用多尺度小波变换来除去干扰,或者在测量环节采用惯性环节或分频法来降低干扰^[6,26]。另一方面,由于噪声干扰的平均值为零^[25],因此可采用积分法降低干扰的影响。需指出的是,高采样频率易受噪声的干扰。以云广特高压直流工程为例,行波保护的采样频率为10kHz,其抗干扰能力差,当噪声为2%时,保护会误动^[22-24]。

1.3 柔直电网保护的的特殊性

不同系统的保护方案在技术要求和故障特性上具有差异性。该部分通过总结柔直电网保护的的特殊性,为保护方法的借鉴与改进提供思路。

1.3.1 与交流系统比较

交流系统惯性常数较大,故障响应速度慢^[13]。同时交流设备承受过流能力大于功率半导体器件,因此直流电网在短路故障时面临更严峻的系统安全问题^[14]。基于以上考虑,交流系统的保护动作时

间较长。以三段式过流保护为例,延时限过流保护(即过流保护的 段)可以保线路全长,其动作时间大于 0.5s,远大于柔直电网保护的動作时间。因此基于工频周期分量的交流保护,如三段式过流保护和距离保护不能适用于柔直电网。

当交流系统发生不对称故障时,电流和电压会产生不对称分量,分别为正序、负序和零序分量。而直流电网发生不对称故障,如单极接地故障时,会产生零模和线模分量^[27]。故基于不对称分量的保护思路可以借鉴到柔直电网保护当中。考虑到直流线路不存在线路换位、分支等因素的影响^[28],某一线路上的波过程受其他线路影响较小,健全极与故障极之间的差异性更为明显。

交流系统受故障发生时刻影响大。按照行波理论,故障点会产生以一电压行波,并向线路两侧传播。若故障时刻正处于电网电压过零时刻,行波检测将比较困难。直流线路的行波过程不需要考虑初始相角的影响,即行波波头的幅值与故障发生时刻无关,所以行波信号不再具有不确定性^[28]。另一方面,由于直流线路电气量不受相角的影响,故障电流无自然过零点,这使得电流熄弧困难,给高压直流断路器带来了技术难题^[19]。

1.3.2 与常规直流系统相比

常规直流系统和柔直系统分别依靠半控型的晶闸管和全控型的 IGBT 来进行功率变换。对于晶闸管而言,其通流能力大于 IGBT。以 ABB 公司开发的系列产品为例,所研发的 5STP 45N2800 型号晶闸管通流能力为 7970A^[29];而研发的 5SNA 3000K452300 压接型 IGBT,通流能力仅为 3000A^[30]。由此可见,常规直流系统能够容忍较大的故障电流,这使得常规直流系统对保护的速动性要求较低。以云广特高压直流工程为例,主保护采用行波保护,其动作时间为 16~20ms^[22-24]。同时,常规直流系统可以通过增大整流侧晶闸管的触发角来降低直流电压,进一步降低故障电流,从而不依赖于高压直流断路器来开断故障电流。

直流故障的初始瞬态过程发展很快,而控制系统具有惯性环节与延时,因此故障初始瞬态阶段不受双闭环矢量控制系统的影响。经过故障初始瞬态阶段后,常规直流的控制系统开始起作用。以云广特高压工程为例,故障后初始瞬态阶段,行波保护不受控制系统的影响;而行波保护的后备保护,即低压保护由于受到控制系统的影响,更易启动^[22]。

1.3.3 与两端柔直系统比较

与两端柔直系统相比,直流电网的故障保护更为复杂。直流电网是由多换流站构成的网状结构^[10],在直流电网中,多个换流站会通过网状线路给故障点馈入故障电流,因此故障电流发展将进一步增快^[15]。如图 4 所示,当线路 OHL12 中点发生一短路故障 F_{12} 时,交流电源 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 均向故障点馈入电路电流,因此故障电流的幅值更大。柔直电网的保护不仅要躲交流故障,还要躲母线故障和相邻线路的区外故障,如 F_1 、 F_2 、 F_{14} 和 F_{32} ,这对保护的选择性和整定值的计算提出了更高的要求。故两端系统的保护方案不一定适用柔直电网。

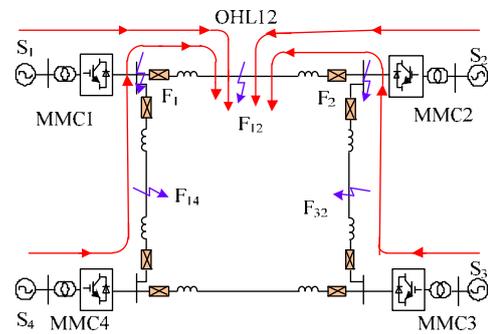


图 4 直流电网故障馈入回路

Fig. 4 Fault feed loop of the DC grid

2 柔直电网的直流故障特性分析

直流故障特性分析是实现保护算法的基础,该部分将从时域和频域 2 方面分析故障特性。

2.1 时域特性分析

2.1.1 直流电压故障特征量

1) 直流电压变化率。

如图 5 所示,直流线路发生短路故障时,故障点会产生一负的电压行波,并向线路两侧传播,因此测量点电压会迅速下降。

在图 5 中, F_1 、 F_2 分别表示线路区外、区内短路故障。在不考虑线路衰减的情况下,发生区外故障 F_1 时,测量电压 V_R 的故障分量 V_{R1} 可用以下等式表示:

$$V_{R1} = \frac{Z_c}{R_f + Z_c} (-V_0) e^{-t/T_L} \quad (3)$$

式中: T_L 为时间常数; Z_c 为线路波阻抗; R_f 为过渡电阻; $-V_0$ 为故障等效电源。

发生区内故障 F_2 时,测量电压 V_R 的故障分量 V_{R2} 可用以下等式表示:

$$V_{R2} = \frac{Z_c}{2R_f + Z_c} (-V_0) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知,发生区外故障时,限流电抗器会使测量点故障电压的波头变得平缓;发生区内故障时,测量电压垂直跃变。因此,可以通过测量直流电压变化率来识别区内外故障。

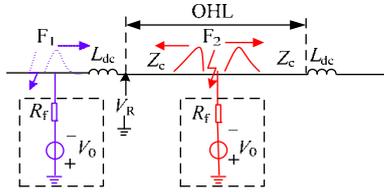


图5 线路故障等效图

Fig. 5 Equivalent diagram under the line fault

2) 直流电压变化量。

当一极线路发生接地故障时,另一极线路上的电压由于耦合作用会受到影响^[6]。根据相模变换,将正负极电压进行解耦合,分解成地模分量和线模分量。其中,线模分量在正负极线路之间构成回路,地模分量与大地构成回路。以正极接地故障为例,正负极电压变化量可用式(5)表示^[6]:

$$\begin{cases} |\Delta V_P| = \frac{Z_0 + Z_1}{Z_0 + Z_1 + 2Z_g} E \\ |\Delta V_N| = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1 + 2Z_g} E \end{cases} \quad (5)$$

由于 $Z_0 + Z_1 > Z_0 - Z_1$, 所以 $|\Delta V_P| > |\Delta V_N|$ 。同理,发生负极接地故障时, $|\Delta V_P| < |\Delta V_N|$ 。故利用正负极电压变化量可以进行故障选极。

2.1.2 直流电流故障特征量

故障电流包含丰富的故障信息,其幅值、变化率和极性均可以作为故障检测的依据。

1) 故障电流的幅值。

故障发生瞬间,子模块电容和交流电源均向故障点馈入短路电流。其中,电容放电是故障电流增大的主要原因。根据故障电流幅值增大这一特征量,可判断是否有故障发生。同时,利用故障电流的幅值可以构成就地保护。断路器一旦检测到流过其本体电流的幅值大于整定值,便立即跳闸。就地保护方案的动作时间快,对断路器的冲击比较小。

2) 故障电流的变化率。

若忽略线路电阻和接地电阻的影响,假设故障距离为 l , 线路单位长度电感值为 L_s , 则保护测量处的电压为

$$V_R = l \times L_s \frac{dI_{dc12}}{dt} \quad (6)$$

由式(6)可知,通过测量保护安装处的电压以及故障电流的变化率可以实现故障测距功能。

同时,平波电抗器电压的大小与电流变化率成正比。如图6所示,限流电抗器电压 V_{L12} 可用式(7)表示。

$$V_{L12} = L_{dc} \frac{dI_{dc12}}{dt} \quad (7)$$

文献[31]对限流电抗器的电压 V_{L12} 求一次导数,相当于对电流变化率求二次导数,其值受故障电阻的影响较小。因此,可以用电感电压的幅值与变化率实现故障检测功能。

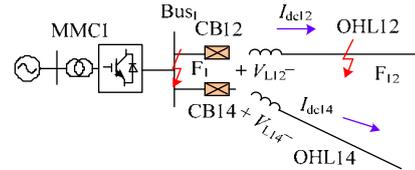


图6 限流电抗器电压示意图

Fig. 6 Diagram of the current limiting reactor voltage

3) 故障电流的极性。

故障电流的极性与故障发生的位置有关。如图6所示,假定电流参考方向以母线流向线路为正向。以线路保护 CB12 为例,当线路发生反方向故障 F_{12} 时, I_{dc12} 的极性为负,电感电压 V_{L12} 的值小于零;当线路发生正方向故障 F_{12} 时, I_{dc12} 的极性为正,电感电压 V_{L12} 的值大于零。因此,故障电流的极性可以作为方向元件,识别正反向故障。

2.1.3 电压电流组合式特征量

所谓电压电流组合式特征量,就是对电压和电流按照某一关系进行组合,构造新的观测物理量,从而实现故障检测功能。

1) 组合功率变化量。

定义组合功率变化量 Δp 为电压变化量 Δu 和电流变化量 Δi 的乘积,即

$$\Delta p = \Delta u \times \Delta i \quad (8)$$

与 Δi 相比, Δp 利用电压变化量提高反应过渡电阻的灵敏性;与 Δu 相比, Δp 利用电流变化量的极性区分正反向故障。因此, Δp 可以扩大区内外故障的差异性,提高故障识别的选择性与灵敏性。

2) 测量阻抗。

测量阻抗 Z 定义为电压变化量 Δu 和电流变化量 Δi 的比值。

根据行波理论,线路发生正向故障时,测量点同时检测到前行波与反行波,故测量阻抗 Z 为

$$Z = \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{u_b + u_f}{i_b - i_f} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} Z_c \quad (9)$$

式中: ρ 为反射系数; u_b 为反行波; u_f 为前行波。

发生反向故障时，测量点只检测到前行波，故测量阻抗 Z 为

$$Z = \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{u_f}{i_f} = Z_c \quad (10)$$

故利用 Z 的差异性可以构成纵联保护。

2.1.4 反行波特征量

如图 7 所示，当线路发生故障时，故障点发出的行波向线路两侧传播，并不断地发生折反射，其中前行波和反行波的定义可以用式(11)表示。

$$\begin{cases} u_b = (\Delta u - \Delta i \times Z_c)/2 \\ u_f = (\Delta u + \Delta i \times Z_c)/2 \end{cases} \quad (11)$$

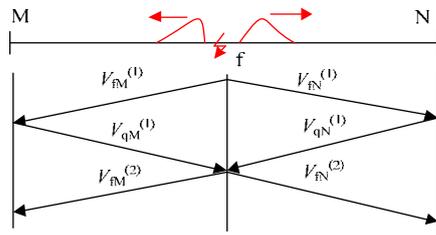


图 7 行波折反射电路图

Fig. 7 Refraction and reflection of travelling waves

发生区内故障时，保护测量处首先检测到的行波是反行波，该反行波不受限流电抗器的影响，幅值大，且具有一定的阶跃特性；发生区外的正向故障时，反行波受到限流电抗器的衰减作用，其幅值有所减少，但保持较大的值，然而其波形变得平缓，无突变点；发生区外反方向故障时，保护测量处首先检测到前行波，反行波幅值较小，几乎为零。故利用区内外反行波的差异性可实现故障的检测。

根据以上分析，可以利用反行波幅值的大小来区分正向故障与反向故障；再通过对反行波进行二次求导，检测波形的突变性，来实现正向区内故障与正向区外故障的识别。

2.2 频域分析

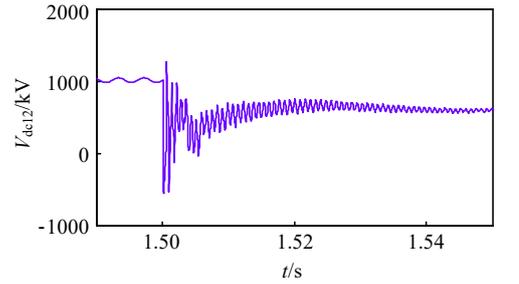
频域分析是研究故障特性的另一种手段，包括电压频率特性分析、电流频率特性分析以及差动电流频率特性分析。

2.2.1 电压频率特性分析

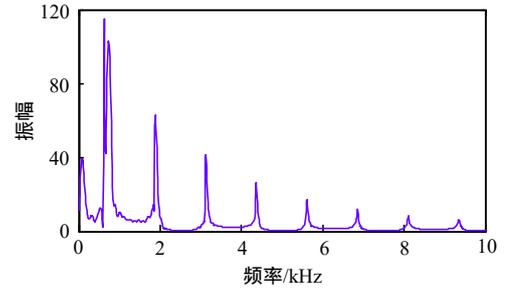
由于行波多次折反射的叠加，以及不同频率的行波分量到达保护安装处的时间不同，使得保护安装处所测得的电压具有很大的高频暂态分量^[32]。以图 1 所示系统为例，当线路 OHL12 中点发生金属短路故障时，对直流电压 V_{dc12} 进行傅里叶变换，母线电压 V_{dc1} 波形及频谱如图 8 所示。

由图 8 中电压波形可知，直流线路发生短路故障时，直流电压会迅速下降，并出现振荡。由频谱

分析结果可得，直流电压含较大的高频分量。



(a) 直流电压 V_{dc12} 波形图



(b) 直流电压 V_{dc12} 频谱

图 8 直流电压波形以及频谱

Fig. 8 Voltage waveforms and spectrums

限流电抗器 L_{dc} 为线路保护提供了边界条件。以图 1 所示系统为例，线路 OHL12 中点发生金属性故障时，简化后的故障等效网络如图 9 所示。

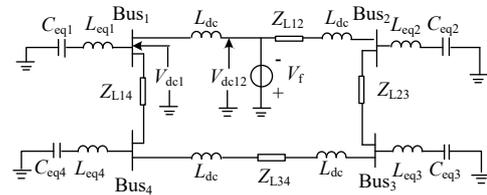


图 9 简化故障等效电路图

Fig. 9 Simplified fault equivalent circuit diagram

由于 MMC3 离故障点较远，其向故障点馈入的短路电流较小，因此可以忽略线路 OHL34 上的短路电流。故限流电抗器线路侧的直流电压 V_{dc12} 和阀侧母线电压 V_{dc1} 之比为

$$|H(j\omega)| = \frac{V_{dc12}}{V_{dc1}} = \frac{2Z_{dc} + Z_{L12} + Z_{MMC1} \parallel Z_{\Sigma}}{Z_{MMC1} \parallel Z_{\Sigma}} \quad (12)$$

式中： Z_{Σ} 和 Z_{MMC1} 分别为

$$\begin{cases} Z_{MMC1} = \frac{1}{3} j(2\omega L_1 - \frac{N}{2\omega C_1}) \\ Z_{\Sigma} = Z_{MMC4} + 4Z_{dc} + 2Z_{L14} \\ Z_{MMC4} = \frac{1}{3} j(2\omega L_4 - \frac{N}{2\omega C_4}) \end{cases} \quad (13)$$

对于高频段， $Z_{MMC1}/Z_{\Sigma} \ll 1$ ，式(12)可化简为

$$|H(j\omega)| = \frac{2Z_{dc} + Z_{L12} + Z_{MMC1}}{Z_{MMC1}} \quad (14)$$

对于低频段,式(12)可简化为

$$|H(j\omega)| = |2Z_{dc} + Z_{L12} / Z_{\Sigma} + 1| \quad (15)$$

由式(14)和(15)可得线路电压与母线电压之比的幅频特性,如图 10 所示。

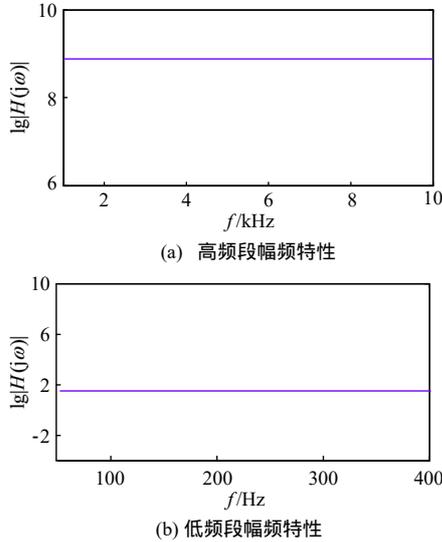


图 10 幅频特性

Fig. 10 Relation between amplitude and frequency

观察幅频特性可知,在限流电抗器 Z_{dc} 与换流站等效阻抗 Z_{cov} 的共同作用下,电压高频分量发生衰减,低频分量得到加强。因此,区外故障下电压高频分量小,低频分量大;区内故障下电压高频分量大,低频分量小。通过测量高低频电压幅值比以及高频分量的幅值,可以实现区内外故障的识别。

2.2.2 电流频率特性分析

除保护安装处测得的电压具有高频分量外,电流也具有高频分量。其中,电压高频分量与行波高频分量近似,其频率段为 10~100kHz。而电流高频分量由等效回路的振荡频率所决定,其频率段为几百赫兹^[33]。以两端 MMC 系统为例,线路中点发生金属性短路时,故障等效网络如图 11 所示。

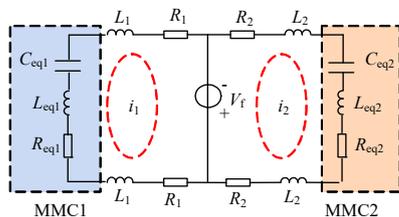


图 11 两端 MMC 系统故障等效网络

Fig. 11 Network of the two-terminal MMCs

图 11 中, $L_{1(2)}$ 、 $R_{1(2)}$ 、 $C_{eq1(2)}$ 、 $L_{eq1(2)}$ 、 $R_{eq1(2)}$ 分别为

$$\begin{cases} L_{1(2)} = L_{dc} + 0.5L_{line}; R_{1(2)} = 0.5L_{line} \\ C_{eq1(2)} = \frac{6C_{1(2)}}{N}; L_{eq1(2)} = \frac{2L_{1(2)}}{3}; R_{eq1(2)} = \frac{2R_{1(2)}}{3} \end{cases} \quad (16)$$

式中 $L_{1(2)}$ 、 $R_{1(2)}$ 、 $C_{1(2)}$ 分别表示 MMC 的桥臂电感、电阻和子模块电容值。

根据二阶响应,可得图 11 中电流 i_1 、 i_2 的振荡频率,如式(17)所示。

$$\begin{cases} \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{(L_{eq1} + 2L_1)C_{eq1}} - \left(\frac{R_1 + 0.5R_{eq1}}{L_{eq1} + 2L_1}\right)^2} \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{(L_{eq2} + 2L_2)C_{eq2}} - \left(\frac{R_2 + 0.5R_{eq2}}{L_{eq2} + 2L_2}\right)^2} \end{cases} \quad (17)$$

由式(18)可知,当发生短路故障时,故障电流将会出现角频率分别为 ω_1 和 ω_2 的高频分量。

对于直流电网而言,故障网络更为复杂,故障电流馈入源增多,所以故障电流将会出现不同频率的高频分量的叠加,但其值仅为几百赫兹。与电流高频频率相比,电压的高频频率较大。因此区内外故障下,电压高频分量的差异性更为明显。

2.2.3 差动电流频率特性分析

以图 1 所示系统为例,线路 OHL12 的差动电流表达式如下:

$$i_d = |i_{dc1} - i_{dc2}| \quad (18)$$

当发生线路区内故障 F_{12} 时, i_d 等于线路故障电流,其频率为电流 i_{dc1} 和 i_{dc2} 频率的叠加,大小为几百赫兹。发生区外故障 F_1 时,差动电流 i_d 为对地杂散电容电流。电容电流的大小与线路电压的导数成正比,故电容电流的频率与线路电压频率有关,其值为 10kHz 以上。因此,利用区内外差动电流高频分量的差异性可以识别区内外故障^[33]。

综上所述,基于时域分析的保护算法原理简单,易于实现,有较好的工程经验;基于频域分析的保护算法受故障电阻与运行方式影响小,更能反应故障所具有的本质特性,常用来进行故障识别与故障测距,但频域分析需要通过各种变换来实现,较为复杂。

3 架空柔直电网线路保护常用方法分类

根据故障特性分析方法,常用保护方法可分为基于时域分析的故障保护方法和基于频域分析的故障保护方法,例如,采用时域特征量的行波保护方案和采用频域特征量的小波变换保护方案。进一步地,结合时域和频域分析的优点,诸多学者还提出了“基于边界条件的保护方案”和“基于智能算法的保护方案”。

3.1 基于行波的保护方案

行波是由故障点发出,向线路两侧传播的电磁

波,其传播过程是电磁能量的转换过程。由于行波包含丰富的故障信息和高频信息^[22-24],故常用来进行故障识别与故障测距。行波保护作为超高速保护,不受电流互感器饱和的影响,有着良好的工程经验。然而,行波保护易受线路衰减、色散以及折反射的影响,因此具有对高阻故障不灵敏、波头检测困难、抗干扰能力有限、近距离故障无法检测等缺点^[22-24]。

西门子的行波保护方案是以变化率和变化量为基础,通过检测电压变化率、变化量和电流梯度来进行区内外故障的识别。ABB 的行波保护以极波为基础,通过检测极波的变化率来实现区内外故障的检测。由于极波的本质是故障分量所决定的反射波,不受末端折反射的影响,其波头比极间电压更为陡峭,对高阻故障的灵敏性有所提高^[23]。西门子和 ABB 的行波保护方案,对高阻故障不灵敏,所能识别的最大电阻为 100Ω,同时抗干扰能力有限,保护动作时间较长^[22-24]。

为改善行波保护的性,不少学者提出了改进方案。文献[34]和文献[23]分别提出自适应行波保护方案和基于归一化电压变化率的保护方案,这 2 种保护方案耐受过渡电阻能力和抗雷击干扰能力有所提高,但只适用于单极接地故障的检测,且所基于的系统是常规直流系统。

针对柔性直流电网的行波保护,国内外学者已展开了广泛研究。文献[35]利用方向性过流判据和重合时线路的带电信号进行故障识别。该方法会导致正常线路跳闸;文献[36]提出一种基于电流变化率的横差保护方法,该方法能够正确定位故障线路,但母线故障会引起保护误动。为提高保护的选择性,文献[37]利用线路电流的初始上升率,计算故障距离,并依靠距离判据和方向性过流判据来识别区内外故障。然而故障电流初始上升率测量困难,同时,该文献没有讨论保护方案的可靠性与灵敏性。进一步地,文献[26,38-39]提出基于电压变化率的保护方案,其中文献[38-39]对影响电压变化率的因素研究不够深入;文献[26]引入一阶惯性环节来测量直流电压变化率,并分析了故障类型、电阻、位置、时间常数等因素对直流电压变化率的影响。在考虑故障类型和故障位置的前提下,该方法所能识别的最大电阻为 150Ω。文献[40]在分析行波的基础上,综合低压判据、电压变化率判据和方向性过流判据来进行故障检测。但该方法仍然存在反应过

渡电阻能力差的问题。为提高对过渡电阻的反应能力,文献[41]利用电压变化量和电流变化量的乘积来识别区内外故障,该方法耐过渡电阻能力有所提高,但可靠性较差。文献[42]提出一种基于反向行波的保护方案。当反行波幅值大于前行波幅值时,保护立即动作。该方案耐受过渡电阻能力进一步提高,然而这种保护方案只适用于星形接线方式。为进一步提高保护的抗干扰能力,增强保护的可靠性,文献[43]通过计算电流行波的时间常数来识别区内外故障,并配置后备保护提高可靠性,具有一定的抗噪声能力,然而该方法原理与计算复杂。

通过上述文献调研可知,大多数基于时域变化率、变化量或反行波幅值的单端量行波保护原理简单,易于实现,对高阻故障的灵敏性一般、抗噪声和雷击干扰能力差。为进一步提高行波保护的可靠性,不少学者提出行波纵联保护^[44-47]。纵联保护具有较高的选择性,但会带来通讯延时,降低行波保护的速动性。

3.2 基于小波变化等数学工具的保护方案

小波变换作为故障检测最常用的一种数学工具,具有时频局部化和多尺度分解的特点,因此其被广泛应用于奇异信号与非平稳信号的分析。文献[48-49]提出基于小波变换的纵联保护方案。其中,文献[48-49]利用小波变化提取故障电流信号的模极值,并根据小波模极值的极性构成纵联保护的判据;文献[49]利用小波变换提取直流电压与母线电压的细节系数,再利用直流电压与母线电压细节系数的幅值比构成纵联保护。纵联保护方案的速动性较差,因此文献[32,50-53]提出基于小波变换的单端量保护方案。文献[50]利用电压小波系数、电流小波系数和电压变化率 3 个判据进行故障识别,该方法耐受过渡电阻能力差,所能识别的最大电阻为 0.01Ω。为提高对过渡电阻的反应能力,文献[32]提出基于小波时间熵的故障保护方案,该方法耐受过渡电阻能力强,但只适用于单极接地故障。为提高对故障类型的适用性,文献[51-52]提出基于小波能量的保护方案。文献[51]利用小波电流能量和方向元件构成故障识别判据。该方法耐受过渡电阻能力强,但不能进行故障选极。文献[52]利用小波电压能量和电压变化量进行故障识别与故障选极,该方法耐受过渡电阻能力强,且不受与运行方式的影响。为提高保护的可靠性,文献[53]提出基于小波模极值的故障识别和故障选极判据。该方法对高阻

故障灵敏性强,且具有防雷击干扰能力。

除小波变换外,不少文献利用其他数学工具进行故障识别。文献[54]提出基于短时傅里叶变换的保护方案。与快速傅里叶变换相比,短时傅里叶变换克服了时频分辨率差的问题。Hilbert-Huang 变换^[55]作为一种时频分析方法,与小波变换相比,能够更快速、更有效地提取故障信息且具有抗干扰性能,可以精确捕捉行波波头的到达时间。经验模态分解^[56]可以根据数据自身的时间尺度特征自适应完成信号分解,从而实现故障特征量的时频分析。

通过上述调研可知,基于小波变化等数学工具的保护方案技术成熟,对高阻故障灵敏性较高,具有一定的抗干扰能力。相对于导数法或积分法,小波变换等数学工具对奇异点、突变点的检测更敏锐。然而,基于小波变换等数学工具的保护方案存在原理复杂,采样频率高,计算量大,对采样元件要求高等问题。

3.3 基于边界条件的保护方案

两电平 VSC 的直流侧并联大电容,MMC 的线路两端串联限流电抗器,这些物理元件构成柔直电网保护的边界条件。利用边界元件对高频分量的阻滞作用、对变化率的平滑作用,可以提取区内外故障特征量的差异性。同时,利用边界条件自身的特征,如电感电压和电容电流信息也可以进行故障特征量的提取。由以上思路所构成的保护方案称为基于边界条件的暂态保护方案。

文献[57]提出基于高频段下直流电压与母线电压幅值比的主保护方案。考虑到过渡电阻的影响,主保护不能保全长,因此需要纵联保护作为后备保护来提高选择性。不少行波保护依靠线路边界元件(如限流电抗器)使得区内外形成不同的暂态特征,如文献[26,38-39];同时文献[50-53]所提的基于小波变换等数学工具的保护方案也依赖于边界条件形成区内外故障的差异性。由此可见,基于边界条件的保护方案与基于小波变换、基于行波思想的保护方案有所交叉。

文献[58]利用电感电压和直流电压变化量来实现线路故障与母线故障的识别。文献[31]提出基于限流电抗器电压变化率的保护方案,由于电感电压变化率是电流的二次导数,因此该保护方法耐受过渡电阻能力强。文献[30,58]所提保护方案均不能识别单极接地故障。为提高对故障类型的适用性,文献[59]提出基于限流电抗器电压幅值的保护方案,

该方案具备故障选极功能,然而该保护方案耐受过渡电阻有限,所能识别的最大电阻为 100Ω。为提高保护方案的可靠性,文献[21]利用并联大电容的电流波形与故障电流波形相似性构造故障识别判据,该保护方案具有一定的抗噪声能力,但所能识别的最大电阻为 8Ω。文献[60]利用电容电流来实现故障距离的测量,从而实现故障检测功能。该方案具有一定的抗干扰能力与耐过渡电阻能力。

与行波保护相比,基于边界条件的保护方案对抗噪声干扰与耐过渡电阻的能力有所提高。与基于小波变换等数学工具的保护方案相比,基于电容电流或电感电压的边界保护方法,计算量小,避免了多尺度小波变换所带来的延时,适合作为主保护方法之一。

3.4 基于智能算法的保护方案

随着人工智能的发展,智能算法开始逐渐应用于直流电网的保护领域。基于智能算法的保护方案避免了复杂的阈值整定和计算过程,且能同时满足速动性与选择性的要求。

文献[61]利用 4 个神经网络来实现故障检测与故障定位功能,其训练工作量大,较为复杂。文献[62]通过比较频谱之间的差异性实现故障特征量的选取。与文献[61]相比,该方案利用 3 个神经网络来依次实现故障检测、故障分类和故障定位功能,工作量有所减少,但依然很复杂。文献[63]利用小波变换与模糊 C 均值算法实现故障特征量的提取,该方法并未考虑过渡电阻的影响且故障特征量的提取过程复杂。文献[64]提出基于模糊控制算法的保护方案,该保护方案利用多层小波变换提取故障特征量,并通过训练权值实现故障识别功能。该方法耐过渡电阻能力差,所能识别的最大电阻为 50Ω。文献[65]提出一种基于机器学习的保护方法。该方法能够满足选择性与速动性的要求,但该方法需要沿线路装设大量的电流传感器,这将增加投资成本。

与非智能保护算法相比,智能保护方法避免了复杂的整定过程和计算过程,并完善了保护功能。但其工程实践性差,权值与阈值的训练过程复杂,处于研究初步阶段。

综上,通过上述文献调研,柔直电网典型保护方案性能对比如表 2 所示。其中,“/”表示文献没有对该技术要求进行讨论;“√”表示该方法能满足该技术要求;“×”表示该方法不能满足该技术要求。

表 2 不同保护分类下典型保护方法的性能对比情况

Tab. 2 Performance of typical protection methods under different protection classifications

技术要求	行波方法在柔直保护中应用							基于智能算法的保护方案					
文献	[35]	[6]	[36]	[26]	[40]	[43]	[42]	[44]	[65]	[64]	[61]	[62]	[63]
选择性	×	√	×				√					√	
速动性					×			通讯延时					√
过渡电阻/ Ω	/	100	200	100	60	200	300	200	500	50	50	69	10
故障类型						√							√
故障选极	×		√				×		√	×	×	√	×
抗噪声干扰			/			√	/	√	√			/	
抗雷击干扰						/						/	
采样频率/kHz	/		20	5	/		200	250	5	2	/	10	50
其他缺点	母线故障误动 / 原理复杂 特定接线方式							原理复杂 互感器多 双端系统 4个ANN 3个ANN 特征量提取复杂					
技术要求	基于小波变换等数学工具的保护方案							基于边界条件的暂态保护方案					
文献	[48]	[50]	[51]	[52]	[54]	[32]	[56]	[57]	[58]	[30]	[60]	[21]	
选择性					√							√	
速动性	通讯延时					√						√	
过渡电阻/ Ω	400	0.01	300	300	50	300	100	400	100	1000	500	8	
故障类型			√			×	√	√	√	×	√	√	
故障选极	√	×	×	√	×	×	√				×		
抗噪声干扰				/				√		/		√	
抗雷击干扰			/			√	/			/			
采样频率/kHz	10	20	50	20	20	10	20	10			/		
其他	理论和技术研究成熟，工程实践性强，可实现超高速保护							目前处于研究的初级阶段，需要进一步的工程验证					
技术要求	基于小波变换等数学工具的保护方案							基于边界条件的暂态保护方案					
文献	[48]	[50]	[51]	[52]	[54]	[32]	[56]	[57]	[58]	[30]	[60]	[21]	
选择性					√							√	
速动性	通讯延时					√						√	
过渡电阻/ Ω	400	0.01	300	300	50	300	100	400	100	1000	500	8	
故障类型			√			×	√	√	√	×	√	√	
故障选极	√	×	×	√	×	×	√				×		
抗噪声干扰				/				√		/		√	
抗雷击干扰			/			√	/			/			
采样频率/kHz	10	20	50	20	20	10	20	10			/		
其他	理论和技术研究成熟，工程实践性强，可实现超高速保护							目前处于研究的初级阶段，需要进一步的工程验证					
技术要求	基于小波变换等数学工具的保护方案							基于边界条件的暂态保护方案					
文献	[48]	[50]	[51]	[52]	[54]	[32]	[56]	[57]	[58]	[30]	[60]	[21]	
选择性					√							√	
速动性	通讯延时					√						√	
过渡电阻/ Ω	400	0.01	300	300	50	300	100	400	100	1000	500	8	
故障类型			√			×	√	√	√	×	√	√	
故障选极	√	×	×	√	×	×	√				×		
抗噪声干扰				/				√		/		√	
抗雷击干扰			/			√	/			/			
采样频率/kHz	10	20	50	20	20	10	20	10			/		
其他	理论和技术研究成熟，工程实践性强，可实现超高速保护							目前处于研究的初级阶段，需要进一步的工程验证					
技术要求	基于小波变换等数学工具的保护方案							基于边界条件的暂态保护方案					
文献	[48]	[50]	[51]	[52]	[54]	[32]	[56]	[57]	[58]	[30]	[60]	[21]	
选择性					√							√	
速动性	通讯延时					√						√	
过渡电阻/ Ω	400	0.01	300	300	50	300	100	400	100	1000	500	8	
故障类型			√			×	√	√	√	×	√	√	
故障选极	√	×	×	√	×	×	√				×		
抗噪声干扰				/				√		/		√	
抗雷击干扰			/			√	/			/			
采样频率/kHz	10	20	50	20	20	10	20	10			/		
其他	理论和技术研究成熟，工程实践性强，可实现超高速保护							目前处于研究的初级阶段，需要进一步的工程验证					
技术要求	基于小波变换等数学工具的保护方案							基于边界条件的暂态保护方案					
文献	[48]	[50]	[51]	[52]	[54]	[32]	[56]	[57]	[58]	[30]	[60]	[21]	
选择性					√							√	
速动性	通讯延时					√						√	
过渡电阻/ Ω	400	0.01	300	300	50	300	100	400	100	1000	500	8	
故障类型			√			×	√	√	√	×	√	√	
故障选极	√	×	×	√	×	×	√				×		
抗噪声干扰				/				√		/		√	
抗雷击干扰			/			√	/			/			
采样频率/kHz	10	20	50	20	20	10	20	10			/		
其他	理论和技术研究成熟，工程实践性强，可实现超高速保护							目前处于研究的初级阶段，需要进一步的工程验证					
技术要求	基于小波变换等数学工具的保护方案							基于边界条件的暂态保护方案					
文献	[48]	[50]	[51]	[52]	[54]	[32]	[56]	[57]	[58]	[30]	[60]	[21]	
选择性					√							√	
速动性	通讯延时					√						√	
过渡电阻/ Ω	400	0.01	300	300	50	300	100	400	100	1000	500	8	
故障类型			√			×	√	√	√	×	√	√	
故障选极	√	×	×	√	×	×	√				×		
抗噪声干扰				/				√		/		√	
抗雷击干扰			/			√	/			/			
采样频率/kHz	10	20	50	20	20	10	20	10			/		
其他	理论和技术研究成熟，工程实践性强，可实现超高速保护							目前处于研究的初级阶段，需要进一步的工程验证					

4 主保护与后备保护的配合

上述内容主要是针对线路主保护方案进行总结对比，并未涉及主保护和后备保护的配合问题。对于线路主保护而言，其作用是快速且可靠地检测本线路故障，并向线路两侧的断路器下发开断指令。主保护方案为了躲最严重的区外故障，使得对高阻故障的灵敏性不足。后备保护的作用有 2 个：其一，当本线路的保护设备或断路器失灵时，应可靠动作，这类后备保护，一般是采用主保护双重化配置或者远后备的方式实现，这里不作为重点阐述；其二，发生区内故障，本线路的主保护拒动时，应可靠动作。这类后备保护又称为近后备保护，也是本文重点阐述的后备保护。对于柔直电网而言，后备保护应先于交流保护动作，故保护时间应小于 20~30ms。图 12 展示了主保护、后备保护、交流保护的时序配合图。其中，交流保护的动作为 80ms，而故障线路去游离的时间为

150~350ms。

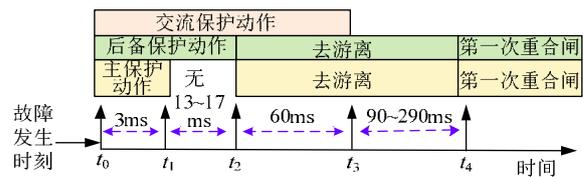


图 12 不同保护的时序配合图

Fig. 12 Time fit diagram for different protections

常用的后备保护方案有 2 大思路。一个是单端量后备保护，如低压保护，其原理是降低整定值或增大数据窗口；以云广特高压直流工程为例，采用低压保护作为行波保护的后备保护，其数据窗长达 12ms。基于单端量的后备保护方案，具有较高的选择性与耐过渡电阻能力。另一个是双端量后备保护，即纵联保护，其原理是利用双端的信息量进行故障检测。纵联保护具有绝对的选择性和可靠性。纵联保护分为 2 大类，一类是基于同步数据的纵联保护方案，如：电流差动保护和行波差

动保护^[66]。

其中电流差动保护易受线路电容电流的影响；而行波差动保护通过引入电压量构成行波，并考虑行波的空间传播特性，从根本上解决了线路分布电容电流的问题。为了减少同步通讯误差，该类保护方案需要配置 GPS，这将会加大投资成本。另一类是基于事件的纵联保护。这类保护的数据处理是在本站完成的，信息通道上只传输数据处理结果。如纵联方向式保护。该类纵联保护无同步通讯要求。

5 常用故障保护方案仿真对比

本文在 PSCAD/EMTDC 平台中搭建图 1 所示的四端 MMC 直流电网模型。其中，MMC1 站采用定直流电压控制，其余各站采用定有功功率控制。假设功率的流向以注入直流电网为正方向，则 MMC2~MMC4 分别向直流电网输送的有功功率为 0.95pu、0.95pu 和 -0.95pu；MMC1~MMC4 输送的无功功率为 0.1pu、0.15pu、0.1pu 和 0.1pu。各线路所安装的限流电抗器值均为 0.15H。线路 OHL12、OHL14、OHL32 和 OHL43 的长度分别为 240km、120km、100km 和 200km。系统参数与各换流站的参数如表 3—4 所示。

表 3 测试系统参数

Tab. 3 Parameters of the test system

换流站	直流电压/kV	交流电压/kV	额定功率/MW
MMC1	±500	500	3000
MMC2	±500	500	2000
MMC3	±500	500	2500
MMC4	±500	500	1500

表 4 各换流站参数

Tab. 4 Parameters of each convert station

换流站	桥臂	子模块	子模块额	桥臂子
	电感/mH	电容/mF	定电压/kV	模块数
MMC1	96	15	5	200
MMC2	144	10	5	200
MMC3	115	12.5	5	200
MMC4	192	8	5	200

分别对文献[23]中的“归一化电压变化率”保护方案(其中归一化电压变化率的定义为:电压变化率的最大值除以电压变化量)和文献[41]所提方法进行改进，在原方法基础上增加故障选极判据，并记为“改进型归一化电压变化率保护方案(NROCOV)”、“改进型组合式功率变化量保护方案(Δp)”；对文献[52]中的故障启动判据整定值进行修

改，记为“改进型小波电压能量(E_h)”；对文献[59]保护方案流程进行调整，先进行故障选极，再进行故障识别，记为“改进型限流电抗器电压(V_L)”。前 2 种保护方案属于“基于行波思想的保护方案”，第 3 种保护方案属于“基于小波变换等数学工具的保护方案”，最后 1 种保护方案属于“基于边界条件的暂态保护方案”。对上述 4 种保护方案进行仿真对比。

5.1 保护算法相关物理量及整定值

上述保护方案整定值分别如表 5—8 所示。

表 5 基于改进型归一化电压变化率保护方案整定值

Tab. 5 Setting about developed NROCOV

物理量	整定计算值
D_v	450kV/ms
Δ_p/Δ_n	40kV/-40kV
set _p /set _n	2
set _d	3
t_{set}	1ms

表 6 基于改进型组合式功率变化量整定值

Tab. 6 Setting about developed Δp

物理量	整定计算值
D_v	-300kV/ms
Δ_p/Δ_n	10/-10
set _p /set _n	17
set _d	60
t_{set}	0.5ms

表 7 基于改进型小波能量保护方案整定值

Tab. 7 Setting about the developed E_h

物理量	整定计算值
D_v	-200kV/ms
Δ_p/Δ_n	50kV/-50kV
E_{setp}/E_{setn}	30
E_{setd}	350
t_{set}	1.5ms
采样频率	20kHz
层数 j	1
小波母函数	Symlets8

表 8 基于改进型电感电压保护方案整定值

Tab. 8 Setting about the developed V_L

物理量	整定计算值
D_v	-200kV/ms
Δ_p/Δ_n	90kV/-90kV
E_{setp}/E_{setn}	75
E_{setd}	140
t_{set}	0.5ms

图 13 为基于改进型归一化电压变化率的保护方案的流程图。其他方案流程图可参照图 13 得到。

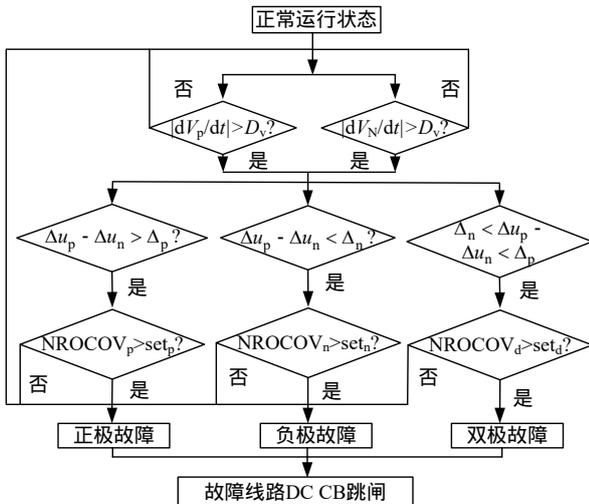


图 13 基改进型归一化电压变化率的保护方案流程图

Fig. 13 Flow chart of protection about NROCOV

5.2 考虑过渡电阻的影响

通过对高阻故障进行仿真分析，对比 4 种保护方案对过渡电阻的反应能力。表 9 列出了 4 种保护方法在全线范围能所能识别的最大值。

表 9 不同保护方案所能识别的最大电阻值

Tab. 9 Maximum fault resistance that different schemes can identify

保护方案	所能识别最大阻值/ Ω
NROCOV	500
Δp	300
E_b	500
V_L	100

以线路保护 CB12 为例，分别设置不同电阻值的区内故障以及对区外故障(F_1 与 F_2)。图 14 和图 15 分别展示了发生双极短路故障和单极接地故障时，不同电阻下保护方案判据计算值的大小。

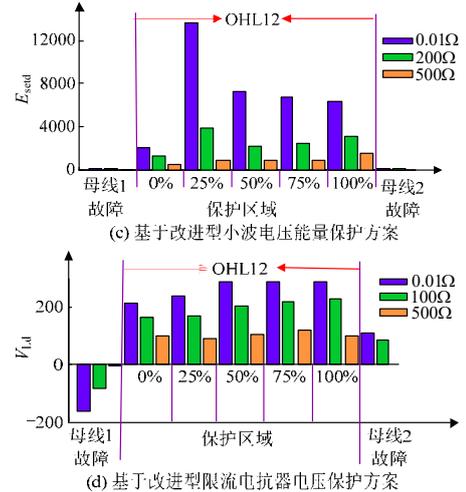
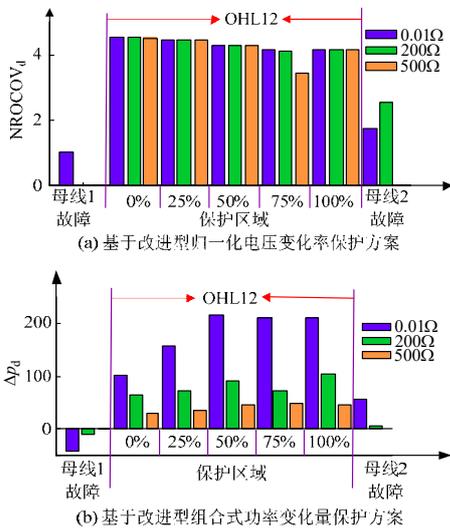


图 14 不同过渡电阻极对极故障下判据计算值的大小
Fig. 14 Values under different resistance under PPF

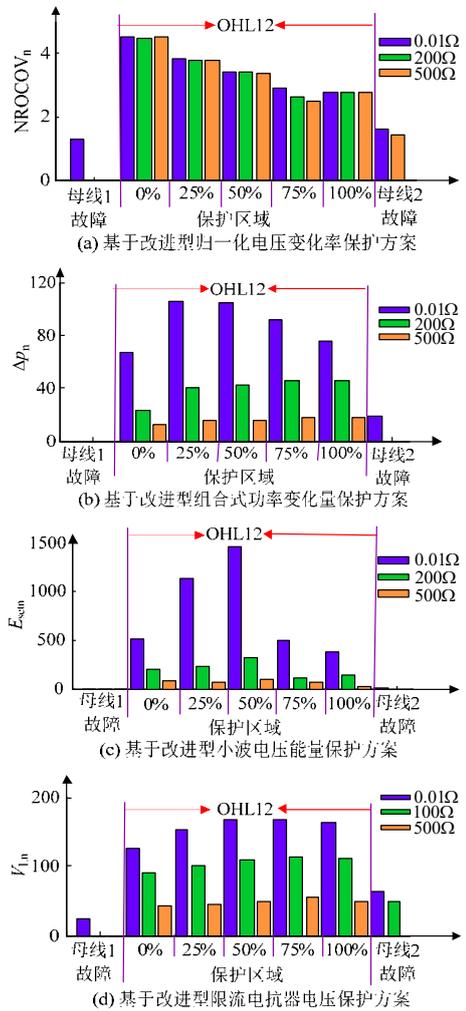


图 15 不同过渡电阻接地故障下判据计算值的大小

Fig. 15 Values under different resistances under PGF

由图 14(a)和图 15(a)可知，基于改进型归一化电压变化率的保护方案受故障电阻的影响小，其所耐受过渡电阻能力强。在图 14(b)和图 15(b)中，区内故障下的组合式功率变化量随着过渡电阻的增大而减小，当电阻值小于 200 Ω 时，其最小值仍大

于区外故障的最大值。观察图 14(c)和图 15(c)可得,基于改进型小波电压能量的保护方案对过渡电阻反应能力高。与小波电流能量相比^[39],小波电压能量受过渡电阻影响小。与过流保护、低压保护、直流电压变化率相比,小波能量受线路衰减以及过渡电阻的阻尼影响小。通过对比图 14(d)和图 15(d)可知,基于改进型电感电压幅值的保护方案耐过渡电阻能力一般。电感电压为保护方案提出了新思路,且简单可行,但国内外学者对电感电压保护的研究不够深入,多停留在变化率和幅值层面,对故障电阻和故障类型等因素的研究不够全面。

5.3 考虑功率翻转

柔直电网的运行方式灵活,因此有必要验证潮流变化对保护的影响。功率翻转是潮流变化最大的情况。表 10 列出了功率翻转后保护的動作情况。

表 10 功率翻转后保护的動作情况

Tab. 10 Actions of the protection after power reversal

保护方案	保护動作情况
NROCOV	正确動作
Δp	拒動
E_h	正确動作
V_L	正确動作

由表 10 可知,除基于组合式功率变化量外,其余 3 种保护方案均能正确動作。分析原因,功率翻转不会改变直流电压的大小与极性,但会改变电流的方向,故基于改进型组合式功率变化量的方案在功率翻转后需要重新计算整定值。

5.4 考虑噪声的影响

分别向信号中添加信噪比为 20db、30db、40db 的噪声分量,来探究噪声对着 4 种保护方法的影响。表 11 展示的是不同信噪比的噪声对这 4 种保护方案的影响。

表 11 不同信噪比的噪声对这 4 种保护方案的影响

Tab. 11 Noise influence under different SNR

保护方案	信噪比/db	保护動作情况
NROCOV	20	誤動
	30	不誤動
	40	不誤動
Δp	20	不誤動
	30	不誤動
	40	不誤動
E_h	20	誤動
	30	誤動
	40	不誤動
V_L	20	不誤動
	30	不誤動
	40	不誤動

由表 11 可知,基于改进型组合式功率变化量和改进型限流电抗器电压的保护方案抗噪声干扰能力强。由于噪声的平均值为零,采用积分信号有利于抗噪声干扰。在基于组合式功率变化量的保护方案中,电压变化量和电流变化量均采用积分值;在基于改进型限流电抗器电压的保护方案中,电感电压也采用积分值,因此提高了抗噪声干扰的能力。

归一化电压变化率的计算需要测量电压变化率,其易受噪声的干扰,因此该保护抗噪声能力差。但随着信噪比的增大,噪声会减弱,故障启动元件不动作,故保护不会誤动。

在基于改进型小波能量的保护方案中,其利用高频段信息识别区内外故障。由于噪声属于高频信息,因此该保护受噪声干扰影响较大。

5.5 检测时间

该部分通过仿真分析来探究这 4 种保护方案是否能满足速动性要求。

影响速动性的因素有 2 个:启动元件的動作时间和数据窗口时间。由于这 4 种保护方案均属于过量保护,即大于整定值即可動作,所以部分保护方案的最快動作时间小于数据窗。考虑到远距离高阻故障的电压变化率较小,故障启动时间长,同时判据的计算值较小,需较长时间积分才能达到整定值,故保护動作时间长。本文在线路 OHL12 末端设置一高阻短路故障,通过检测保护的動作时间,来探究这 4 种保护方是否满足速动性的要求。表 12 为 4 种保护方案的動作时间。

表 12 不同保护方案的動作时间

Tab. 12 Detection time of the different protections

保护方案	故障电阻	故障启动整定值/(kV/ms)	数据窗/ms	检测时间/ms
NROCOV	500 Ω	450	1	1.82
Δp	300 Ω	300	0.5	1.36
E_h	500 Ω	200	1.5	1.79
V_L	100 Ω	200	0.5	0.844

由表 12 可知,保护最长的動作时间不超过 1.9ms,因此这 4 种保护方案均能满足速动性要求。

6 结论

针对架空柔直电网线路保护研究,本文系统地分析了其关键技术问题,并对不同保护方案进行仿真对比,最终得出以下结论:

1) 直流电网对保护的速动性与选择性要求高,

因此常规直流和交流电网的保护方案需进一步改进。为提高对高阻故障的灵敏性，常采用电压测量以及频域分析来构造判据。噪声和雷电流是影响可靠性的两大干扰源，其高频分量高，低频分量小。采样频率越高，保护的精度越高，但采样频率受硬件装置的限制。

2) 时域分析法原理简单，算法易于实现，但可靠性不高；频域分析法原理较复杂，但反应高阻故障的灵敏性有所提高，可靠性增加。

3) 基于行波的保护方案原理简单，有良好的工程经验，但耐过渡电阻能力和抗噪声能力差；基于小波变换等数学工具的保护方案反应过渡电阻能力和抗干扰能力有所提高，但原理复杂，采样频率高，具有一定的小波延时；基于边界条件的保护方案与第一、二类保护方案有所重叠，其中针对电感电压和电容电流的保护方案而言，其原理简单，可靠性高；基于智能算法的保护方案避免了复杂的整定过程和计算过程，并完善了保护功能，但其工程实践性差，权值与阈值的训练过程复杂，处于初步研究阶段。

4) 基于改进型 NROCOV、 Δp 、 E_h 和 V_L 的保护方案均能满足速动性的要求，并能识别不同类型的短路故障以及适用于不同的运行方式。基于 V_L 的保护方案对高阻故障灵敏性较差，所能识别最大电阻为 100Ω 。基于 NROCOV 和 E_h 的保护方案抗干扰能力有限，当噪声分别超过 20db 和 30db 时，保护会误动。

综上，行波保护方案发展成熟，检测速度快；基于小波变换的保护方案在去噪方面具有前景；边界保护的功能尚不完善，可结合“行波保护的速动性”和“小波保护的抗干扰性”优点，进行更为深入的研究；基于智能算法的保护方案还需进行更多的实验验证。

后续研究中，可采用多种方案构成主保护，并进行多路选择，如三选二原则；加强保护阈值整定的理论分析；增强保护的抗噪声与抗雷击能力；进一步完善主、后备保护的时间配合及整定值配合，在借鉴交流主后备保护配合策略的基础上，实现主后备保护的科学配合。

参考文献

[1] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020. Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020(in

Chinese).

- [2] 周竞, 王珂, 王维洲, 等. 自备电厂参与新能源消纳的交易模式效益分析及应用探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 145-150. Zhou Jing, Wang Ke, Wang Weizhou, et al. Benefit analysis and application discussion of trading mode with self-owned power plant participating in renewable energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 145-150(in Chinese).
- [3] 刘秋华, 郑亚先, 杨胜春. 长周期大范围风电消纳的电力电量联合优化模型与应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 145-150. Liu Qiu-hua, Zheng Ya-xian, Yang Sheng-chun. A power and energy joint optimization model and its application for long-term large-range wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 145-150(in Chinese).
- [4] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7. Xiao Chuangying, Wang Ningbo, Ding Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan wind power base [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-7(in Chinese).
- [5] 白建华, 辛颂旭, 贾德香. 我国风电大规模开发面临的规划和运行问题分析[J]. 电力技术经济, 2009, 21(2): 7-11. Bai Jianhua, Xin Songxu, Jia Dexiang. Analysis on the planning and operation problems of large-scale wind power development in China[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21(2): 7-11(in Chinese).
- [6] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流电网架空线路快速保护方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 13-19. Wang Yanting, Zhang Baohui, Fan Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 13-19(in Chinese).
- [7] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J]. 智能电网, 2016, 4(2): 116-123. Tang Guangfu, He Zhiyuan, Pang Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2016, 4(2): 116-123(in Chinese).
- [8] Wang Yizhen, Yuan Zhichang, Fu Jiao, et al. A feasible coordination protection strategy for MMC-MTDC systems under DC faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 103-111.
- [9] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12. Li Bin, He Jiawei, Feng Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12(in Chinese).
- [10] 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(in Chinese).
- [11] 孙棚, 曹士冬, 卜广全, 等. 架空线柔性直流电网构建方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 678-682.
Sun Xu, Cao Shidong, Bu Guangquan. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 678-682(in Chinese).
- [12] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
Xu Zheng, Xue Yinglin, Zhang Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062(in Chinese).
- [13] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 188-189.
Xu Zheng, Xiao Huangqing, Zhang Zheren, et al. Flexible DC transmission system[M]. Edition 2. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017: 188-189. (in Chinese)
- [14] 黄强, 邹贵彬, 高磊, 等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2830-2840.
Huang Qiang, Zou Guibin, Gao Lei, et al. Review on DC transmission line protection technologies of HB-MMC based DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2830-2840(in Chinese).
- [15] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3733.
Wu Ya'nan, Lü Zheng, He Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733(in Chinese).
- [16] 赵成勇, 许建中, 李探. 全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(1): 106-114.
Zhao Chengyong, Xu Jianzhong, Li Tan. DC faults ride-through capability analysis of Full-Bridge MMC-MTDC system[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 43(1): 106-114.
- [17] Wang Sheng, Li Chuanyue, Adeuyi O D, et al. Coordination of MMCs with hybrid DC circuit breakers for HVDC grid protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 11-22.
- [18] Tang Lianxiang, Ooi B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [19] Franck C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [20] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759.
Dong Xinzhou, Tang Lanxi, Shi Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759(in Chinese).
- [21] Yeap Y M, Geddada N, Satpathi K, et al. Time- and frequency-domain fault detection in a VSC-interfaced experimental DC test system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(10): 4353-4364.
- [22] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. $\pm 800\text{kV}$ 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 $\pm 800\text{kV}$ HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 179-188(in Chinese).
- [23] 武霁阳. 高压直流线路行波保护新原理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Wu Jiyang. Research on novel travelling wave protection principles for HVDC transmission lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016(in Chinese).
- [24] 董鑫. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2008.
Dong Xin. Research on theory of traveling wave protection of HVDC lines[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2008(in Chinese).
- [25] 李爱民, 徐敏, 蔡泽祥, 等. 小步长采样的新型直流输电线路行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 90-96.
Li Aimin, Xu Min, Cai Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96(in Chinese).
- [26] 张峻樾, 林卫星, 文劲宇. 基于直流电压变化率的直流电网直流故障保护[J]. 南方电网技术, 2017, 11(1): 14-22.
Zhang Junjie, Lin Weixing, Wen Jinyu. DC fault protection based on change rate of DC voltage in DC grid[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 14-22(in Chinese).
- [27] Zhang Ying, Tai Nengling, Xu Bin. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [28] 王磊. 柔性直流输电线路继电保护原理研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
Wang Lei. Study on the protection principle of VSC-HVDC transmission lines[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017(in Chinese).
- [29] ABB. 5STP 45N2800 datasheet[Z]. 03-2014.
- [30] ABB. 5SNA 3000K452300 datasheet[Z]. 11-2017.
- [31] Li Rui, Xu Lie, Yao Liangzhong. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2017, 32(3): 1516-1526.
- [32] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2179-2185.
Wang Shuai, Bi Tianshu, Jia Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185(in Chinese).
- [33] 贾科, 李猛, 毕天姝, 等. 柔性直流配电线路能量分布差动保护[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3058-3065.
Jia Ke, Li Meng, Bi Tianshu, et al. Energy distribution-based differential protection for VSC-DC distribution lines[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 3058-3065(in Chinese).
- [34] 郑伟, 武霁阳, 李海锋, 等. 特高压直流线路自适应行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1995-2001.
Zheng Wei, Wu Jiyang, Li Haifeng, et al. Research on adaptive travelling wave based protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1995-2001(in Chinese).
- [35] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 多端柔性直流系统直流故障保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4627-4636.
Li Bin, He Jiawei, Li Ye, et al. DC fault protection strategy for the flexible multi-terminal DC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4627-4636(in Chinese).
- [36] Zhang Jie, Zou Guibin, Xie Zhongrun, et al. A fast non-unit line protection strategy for the MMC-based MTDC grid[M]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Beijing: IEEE, 2017: 1-6.
- [37] Ikhide M, Tennakoon S, Griffiths A, et al. Fault detection in multi-terminal Modular Multilevel Converter(MMC) based High Voltage DC(HVDC) transmission system[C]//2015 50th International Universities Power Engineering Conference(UPEC). Stoke on Trent: IEEE, 2015: 1-6.
- [38] Sneath J, Rajapakse A D. DC fault protection of a nine-terminal MMC HVDC grid[C]//11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham: IEEE, 2015: 1-8.
- [39] Sneath J, Rajapakse A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 973-981.
- [40] Leterme W, Beerten J, Van Hertem D. Nonunit protection of HVDC grids with inductive DC cable termination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 820-828.
- [41] Wang Jianping, Berggren B, Linden K, et al. Multi-terminal DC system line protection requirement and high speed protection solutions[C]//CIGRÉ Symposium, Lund, 2015.
- [42] 李岩, 龚雁峰, 姜斌. 一种基于方向行波的多端 VSC-HVDC 系统保护策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 70-73, 83.
Li Yan, Gong Yanfeng, Jiang Bin. A protection scheme for multiterminal VSC-HVDC system based on direction traveling waves[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 70-73, 83(in Chinese).
- [43] Saleh K A, Hooshyar A, El-Saadany E F. Ultra-high-speed traveling-wave-based protection scheme for medium-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1440-1451.
- [44] Azizi S, Sanaye-Pasand M, Abedini M, et al. A traveling-wave-based methodology for wide-Area fault location in multiterminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2552-2560.
- [45] Bazargan M, Maleka K. Fault location algorithm for identifying a faulted section in a meshed multi-terminal HVDC grid[C]//13th IET International Conference on Ac and Dc Power Transmission. Manchester, UK: IEEE, 2017.
- [46] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 采用电流突变量夹角余弦的直流电网线路纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 165-171.
Zhou Jiawei, Zhao Chengyong, Li Chengyu, et al. Pilot protection method for DC lines based on included angle cosine of fault current component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 165-171(in Chinese).
- [47] 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(in Chinese).
- [48] Zou Guibin, Feng Qian, Huang Qiang, et al. A fast protection scheme for VSC based multi-terminal DC grid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 307-314.
- [49] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887.
He Jiawei, Li Bin, Li Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887(in Chinese).
- [50] De Kerf K, Srivastava K, Reza M, et al. Wavelet-based protection strategy for DC faults in multi-terminal VSC HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4): 496-503.
- [51] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.

- Li Bin, He Jiawei, Li Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749(in Chinese).
- [52] 张峻襟, 向往, 饶宏, 等. 含直流断路器的架空柔性直流电网直流故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4631-4645.
- Zhang Junjie, Xiang Wang, Rao Hong, et al. Research on DC fault protection scheme of overhead MMC based DC grid with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4631-4645(in Chinese).
- [53] Kong Ming, Pei Xiangyu, Pang Hui, et al. A lifting wavelet-based protection strategy against DC line faults for Zhangbei HVDC grid in China[C]//19th European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland: IEEE, 2017: P.1-P.11.
- [54] Yeap Y M, Ukil A. Fault detection in HVDC system using short time Fourier transform[M]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, MA: IEEE, 2016: 1-5.
- [55] 张映鸿. 基于 Hilbert-Huang 变换的高压直流输电线路保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- Zhang Yinghong. Research on protections of high-voltage direct current transmission line based on the Hilbert-Huang transform[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013(in Chinese).
- [56] 宁连营, 郇能灵, 郑晓冬, 等. 基于单端暂态电流的 MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5010-5017.
- Ning Lianying, Tai Nengling, Zheng Xiaodong, et al. Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5017(in Chinese).
- [57] Liu Jian, Tai Nengling, Fan Chunju. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1483-1494.
- [58] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 柔性高压直流环网直流侧故障保护策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 1-11.
- Yao Liangzhong, Wu Jing, Wang Zhibing, et al. Studies on DC fault protection strategies for MMC based HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 1-11(in Chinese).
- [59] 周家培, 赵成勇, 李承昱, 等. 基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 89-94, 146.
- Zhou Jiapei, Zhao Chengyong, Li Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 89-94, 146(in Chinese).
- [60] 和敬涵, 周琳, 罗国敏, 等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.
- He Jinghan, Zhou Lin, Luo Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165(in Chinese).
- [61] Santos R C, Le Blond S, Coury D V, et al. A novel and comprehensive single terminal ANN based decision support for relaying of VSC based HVDC links[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 141: 333-343.
- [62] Yang Qingqing, Le Blond S, Aggarwal R, et al. New ANN method for multi-terminal HVDC protection relaying [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 148: 192-201.
- [63] Hossam-Eldin A, Lotfy A, Elgamel M, et al. Artificial intelligence-based short-circuit fault identifier for MT-水相逢 HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2436-2443.
- [64] Bertho R, Lacerda V A, Monaro R M, et al. Selective nonunit protection technique for multiterminal VSC-HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2106-2114.
- [65] Tzelepis D, Dyško A, Fusiek G, et al. Advanced fault location in MTDC networks utilising optically-multiplexed current measurements and machine learning approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97: 319-333.
- [66] 董新洲, 雷傲宇, 汤兰西. 电力线路行波差动保护与电流差动保护的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 1-8.
- Dong Xinzhou, Lei Aoyu, Tang Lanxi. Comparative study of traveling wave differential protection and current differential protection for power lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 1-8(in Chinese).



杨赛昭

收稿日期: 2018-10-16。

作者简介:

杨赛昭(1995), 男, 博士研究生, 主要研究方向为直流电网保护与重合闸、MMC, saizhaoyang@foxmail.com;

*通信作者: 向往(1990), 男, 博士, 主要研究方向为 MMC、直流电网运行与控制, xiangwang1003@foxmail.com;

文劲宇(1970), 男, 教授, 长江学者特聘教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电能存储与电力安全、多端直流输电与直流电网、新能源并网与规划, jinyu.wen@hust.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Research on DC Fault Protection Methods for the MMC Based DC grid

YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

KEY WORDS: overhead MMC based DC grid; line protection; fault characteristics; main protection; backup protection

The overhead MMC based DC grid is an effective solution for renewable power integration over long distance. To deal with DC faults, the high power DC circuit breakers (DCCB) are implemented on the overhead lines. Since the fault current rises rapidly with a large amplitude, DCCBs are required to trip within a few milliseconds, which poses a strict requirement for the fault detection method. This paper systematically analyzes the key technical issues of DC line protection methods for the overhead MMC based DC grids. Firstly, the technical requirements of the DC grid line protection are presented. Then, the fault characteristics of MMC based DC grids are analyzed and the protection methods between MMC based DC grids and other systems are compared. Further, various protection methods dedicated for the MMC based DC grids are surveyed. In addition, the main protection and backup protection are introduced. Finally, the performance of typical protection methods are validated and compared by extensive simulations in PSCAD/EMTDC. The relevant conclusions are as follows:

1) The protection of DC grids requires high speediness and selectivity, so the conventional protection schemes for LCC-HVDC and AC grids are not applicable to the protection of DC grid. In order to improve the sensitivity to high resistance faults, voltage measurement and frequency domain analysis are most used to design the criterion. Noise and lightning are two main factors that will affect reliability. The higher the sampling frequency, the higher the protection accuracy. However, the sampling frequency is limited by the hardware device.

2) Time-domain analysis is simple in principle and easy to implement, but not reliable; the principle of frequency domain analysis is complicated, but the sensitivity and reliability to high resistance faults are improved.

3) The protection scheme based on the traveling wave is simple and has good engineering experience, but has poor reliability. The protection scheme based on the wavelet transform and other mathematical tools are robust to resistance, but they are easily affected by the noise. The protection scheme based on boundary conditions overlaps with the first and the second type of protection schemes. For the protection scheme of the reactor voltage and capacitor current, the principle is simple and the reliability is high. The protection scheme based on the intelligent algorithm avoids the complicated setting process and calculation process, and improves the protection performances, but its engineering practice is poor, and the training process of weight and threshold is complex, which is in the preliminary research stage

4) The protection scheme based on the improved $NROCOV$, Δp , E_h and V_L can meet the requirements of speediness, and can identify different types of faults and are suitable for different operation modes. The protection scheme based V_L has poor sensitivity for resistance fault, and the largest resistance identifying is 100 Ω . The protection scheme based on $NROCOV$ and E_h has the poor anti-interference ability.

5) The fundamental reason for the challenges faced by the protection system of the dc grid is the weak performance of semiconductor devices, current-limit reactor and DCCB. In terms of protection research, most protection principles are not strong, and the setting value is mainly obtained through simulation. The analysis of factors that influences protection performance is not deep enough, and there are few studies on lightning strike and noise interference. In addition, there are few studies on the backup protection. Most of backup protections remain at the research level of pilot protection, and the time coordination and setting value coordination of the main and backup protection are not perfect.