

多端直流系统直流故障保护研究综述

焦在滨^{1,3} 姜振超²

(1. 陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学) 陕西 西安 710049;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

3. 西安交通大学电气工程学院 陕西 西安 710049)

摘要: 对国内外多端直流系统的故障保护问题进行了综述。首先分析了基于电压源型换流器的多端直流系统故障的过程,研究了故障电流的特征和解析表达式。其次讨论了针对多端直流系统的继电保护原理,对电压/电流保护、纵联保护和行波暂态量保护进行的分析。然后针对多端直流系统的故障隔离问题,从选择性和恢复速度的角度对现有的策略进行了分析。最后,建议应当从加强有针对性的继电保护方案研究、重视故障快速恢复过程中换流器的性能以及关注测量环节对故障保护的影响3个方面展开研究工作,解决多端直流输电系统的故障保护问题。

关键词: 多端直流系统; 故障识别; 故障隔离; 继电保护

Abstract: A survey on relay protection for multi-terminal DC systems at home and abroad is given. Firstly, the electromagnetic transient during fault is analyzed in a voltage source-based DC system, and the characteristics and analytical expression of fault current are studied. Secondly, for the issues on fault detection and isolation, many protection schemes, including current and voltage based protection, pilot protection and travelling wave or transient based protection, are discussed. Thirdly, the different fault isolation strategies are compared considering the power system requirements, such as rapidity and reliability. Finally, it is suggested that the further researches in three aspects, including novel algorithms for rapid fault detection in multi-terminal DC system, rapid fault restoration schemes based on converters with special structures and the influences from errors brought by DC current and voltage measurement, should be promoted.

Key words: multi-terminal DC system; fault identification; fault isolation; relay protection

中图分类号: TM73 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2017)01-0063-08

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.014

0 引言

直流输电系统由于其传输容量、传输距离、线路损耗等方面的优势得到了飞速的发展。研究表明,多端直流输、配电系统在大规模及分布式新能源接入、弱系统供电(偏远地区及海岛等)以及城市配电等领域具有巨大的优势。随着电力电子技术的快速发展,多端直流系统将成为未来电力系统的重要组成部分。

直流系统,特别是直流输配电线路故障的快速识别、可靠隔离与迅速恢复对于多端直流输配电系统的安全运行具有重要的意义。由于直流断路器技术尚不成熟,故障处理(识别、隔离与恢复)技术成为制约多端直流输电系统运行的瓶颈。国内外学者

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51377129)

对于多端直流系统的故障处理技术的研究主要包括以下3个方面:

1) 多端直流系统的故障分析

故障分析是故障识别与故障隔离的基础。多端直流系统大多采用电压源型换流器,其故障特征受系统结构、换流器结构以及控制策略的影响,传统电力系统中基于工频电气量分析的故障分析方法显然已经不再适用。

目前,多端直流系统的故障分析主要采用解析分析与电磁暂态仿真相结合的方法,关注的重点包括故障暂态过程、故障电流的特性(峰值及波形)以及故障电流到达峰值的时间等问题。

2) 多端直流系统的故障识别与定位

直流系统的继电保护技术经过多年的发展及工程应用已日趋成熟,虽然新原理不断涌现,但是双端直流输电工程仍采用早期的保护配置并能够可靠运

行。多端直流系统在要求故障识别的快速性和灵敏性之外,由于直流系统成网,在故障隔离过程中对故障元件的识别(定位)有较高的要求。同时,电压源型换流器耐受故障电流的能力较差,要求继电保护在几毫秒内动作并可靠有选择性地隔离故障。如何解决故障识别的可靠性、选择性和快速性之间的矛盾,在多端直流系统尤为突出。

该领域的研究热点在于提出多端直流系统继电保护的新原理与新算法、保护的整定方案等。

3) 多端直流系统的故障隔离与恢复

多端直流系统的一个显著特点是“直流成网”,即当发生故障时需将故障隔离在尽量小的范围之内,保证直流电网中其他健全元件的正常运行。若多端直流系统能够配置性价比及可靠性均满足电力系统要求的直流断路器,其故障隔离和恢复过程与交流系统相同。

在直流断路器技术和经济性不能够满足大面积应用的情况下,如何利用交流断路器与快速隔离开关配合或者考虑换流器的阻断特性来实现故障的快速隔离与迅速恢复是多端直流系统运行必须面对的问题,目前电压源型换流器的重启时间和重启过程都不能满足电力系统的要求,需要着力研究。

下面从多端直流系统的故障分析、故障识别定位和故障的隔离恢复3个方面,对目前国内外的相关研究成果进行了回顾和分析,对未来研究方向进行展望,并提出一些观点,以期能够对今后的相关继电保护问题研究有所助益。

1 多端直流系统故障特征分析

故障特征分析是故障甄别与故障隔离的基础。多端直流系统广泛采用电力电子桥式换流电路,其故障响应具有快速性、非线性、与控制策略强相关性,以同步发电机正弦电源为基础的解析故障方法无法直接应用,目前广泛应用的故障特征分析均基于电磁暂态仿真。即便如此,由于电力电子技术仍处于高速发展的过程中,为解决可靠性、效率、体积等问题,新的器件与电路拓扑不断提出并示范应用,多端直流系统故障特征分析的理论和方法仍是目前研究的热点与难点。

就多端直流输配电系统而言,目前被广泛接受并应用的系统结构包括不对称结构、对称结构和双极结构,换流器一般采用两电平换流器、三电平换流

器以及模块化多电平换流器,国内外关于多端直流系统故障分析的研究均以此为基础。

文献[4-7]以两电平换流器为例,考虑直流系统接线方式,分析了基于电压源型换流器的高压直流输电系统(VSC-HVDC)在发生极间和极-地故障时的故障特征。对极间故障,故障电流由三部分组成^[4-5],分别是:故障发生后换流器电路中电容的放电电流、线路电感通过续流二极管的放电电流^[5-6]以及由交流系统通过续流二极管向故障点提供的短路电流。对于极-地故障,故障电流的组成与接地方式相关^[6],对于典型的对称结构拓扑而言,其故障电流由两部分组成,分别是:故障发生后换流器电路中电容的放电电流和由交流系统通过续流二极管向故障点提供的短路电流。

文献[6]指出,对于多端直流系统,短路电流尚需考虑健全线路的贡献。同时,对于模块化多电平换流器组成的直流系统,由于其各模块独立检测过电流并对模块进行控制,其故障特征与两电平换流器并不完全相同。

文献[7]在理论分析的基础上,给出了极间和极-地故障的等效电路,并理论推导了各个阶段短路电流的解析表达式。特别需要指出的是,该文献在解析分析的过程中,将交流系统提供的短路电流分为暂态短路电流(考虑换流器电容效应)和稳态短路电流两个部分,从而与实际情况更加相符。对于极间故障,交流系统提供的短路电流可通过求解由续流二极管组成的不控整流电路直流侧短路问题得到。对于极-地故障,交流系统提供的短路电流则可通过求解回路中穿有续流二极管的交流电路得到。

无论采用多电平结构,还是采用模块化多电平结构,电压源型换流器均无法独立地阻断直流系统的故障电流并实现故障隔离。为满足电力系统对多端直流系统的运行要求,具有阻断能力的换流器结构及其故障特征成为近年来研究的热点。其中有代表性的包括:全桥子模块多电平换流器^[8]、钳位双子模块换流器^[9]、串联双子模块换流器^[10]和二极管钳位子模块^[11]等。

文献[12]对具有直流故障清除能力的换流器的故障特征进行了分析,指出虽然阻断直流故障的机理不同,但其表现出的故障特征却极为相似,即在电力电子器件关断前的故障特征与多电平换流器一致,电力电子器件关断后交流系统与直流系统完全

隔离,交流系统不向故障点提供持续的短路电流。

阻断时间和阻断能力是表征具有直流故障清除能力的换流器特征的重要指标^[12]。故障阻断时间是指在换流器接到阻断指令到直流短路电流被限制为0的时间,文献[12]通过研究发现,阻断型换流器的故障清除时间为3~8ms不等,其中串联双子模块换流器的阻断时间为3ms,而基于钳位双子模块的换流器阻断时间则为8ms。对于阻断能力,则主要考虑交流线电压与潜在馈流回路电容电压的关系,通过分析,串联双子模块清除故障时潜在馈流回路电容电压要求较低,阻断能力强。

文献[13]比较了不同结构的多端直流输电系统在发生单极对地故障时的故障特征。在不采取控制措施的情况下,电压源型换流器的故障自由(暂态)过程时间为15~20ms。相对于交流系统的故障响应时间,电压源型换流器的故障响应时间非常快,在故障发生后1ms之内,换流器即开始向故障点馈入短路电流,对于单极-大地回线结构的柔性多端直流系统,故障电流达到峰值的时间小于4ms,而若采用单极-金属回线结构形式,则该时间约为6ms,这是由于金属回线回路的阻抗增加了直流电容及健全线路分布电容向故障点放电的时间常数。同理,采用单极-大地回线结构的柔性多端直流系统短路电流的幅值也比单极-金属回线结构的系统大,对设备的安全具有更大的威胁。

柔性直流输电系统的过电压问题与网络结构和控制策略密切相关,在采用单极对称结构的直流系统中,发生极-地故障时,健全极的电压将升高为额定电压的2倍^[4,14]。

虽然从以上的综述可见,国内外学者对基于电压源型换流器的故障过程及故障分析已达成共识,但从论文的仿真结果看,结构形式和控制策略仍然将影响故障电流的具体波形。幸运地是,由于多端直流系统中所采用的全控型电力电子器件耐受过载能力较差,系统要求的故障清除时间不大于5ms^[15],因此故障甄别仅能应用直流电容放电这一阶段的故障信息,对故障暂态全过程波形的细微差别并不敏感。

在故障稳态过程中,无论是采用多电平换流器还是半桥型多电平换流器,交流系统均持续向直流故障点馈入电流,对交流系统而言也是一种故障状态;但是,由于直流系统对故障切除的时间要求严苛,因此,就短路故障传播问题而言,仅在考虑后备

保护时需考虑直流故障对交流系统的影响和保护配合问题。

2 多端直流系统的故障识别与故障定位

故障识别与故障定位算法是故障隔离的基础,是故障清除过程的重要组成部分。交流系统的继电保护经过多年的发展,已经形成了以电压/电流保护、距离保护、行波和暂态量保护以及利用故障后全频带信息的保护等众多的保护原理,并已被直流系统借鉴并在工程中广泛应用。高压直流输电工程普遍采用行波保护、微分欠压保护、纵联电流差动保护、低电压保护等原理识别故障^[16-17],可以说直流系统并没有形成针对自身特点的特殊保护体系,其保护均来源于交流系统,除算法形式外并无特殊之处。

目前,无论是LCC-HVDC直流系统还是VSC-HVDC直流系统大多为“点对点”两端结构,其故障隔离均采用换流器交流侧断路器跳闸的策略。目前的直流系统继电保护原理具有“重故障识别、轻故障定位”、“重快速性和灵敏性、轻选择性”的特点,将其直接应用于多端直流系统的故障识别将会导致故障切除范围扩大等问题,影响交直流系统的安全运行。

基于电压源型换流器的多端直流系统的故障识别与故障定位是目前研究的热点,目前的研究主要集中在电流电压保护、纵联保护、行波及暂态量保护以及基于智能算法的保护原理研究上。

2.1 电流/电压保护

电流/电压保护是最直接反应电力系统故障特征的保护原理,其一般通过电流幅值的增加或电压幅值的降低来识别故障,在多端直流系统中,尚需考虑故障电流升高的速度和持续时间。

文献[18-19]提出了一种基于电流变化率的直流故障识别判据。文献[18]提出了一种针对舰船直流配电系统的过电流保护方案。文献[19]针对多端直流系统提出的保护判据在直流电压跌落时启动,并以直流电流变化量超过电流定值且持续时间超过时间定值作为动作条件。为了防止由于交流系统的扰动造成的不正确动作,采用直流电流的变化率作为闭锁条件,当直流电流变化率小于定值时闭锁保护,防止误动。遗憾的是,文中并未给出相应地整定原则。

为保证选择性,文献[20]设计了一套适用于辐射状直流配电网的保护方案。该保护方案将故障分为近区故障(保证速动性)和远端故障(保证选择性)。在过电流保护判据和电流变化率保护中均采用两段式设置,构建电流速断保护、限时电流速断保护、近区故障电流变化率保护和远端故障电流变化率保护,通过阶段式电流保护的思想实现了辐射状配电网故障的可靠识别。该方案的不足之处在于远端故障的清除时间较长,不能满足多端直流系统对继电保护快速性的要求。

文献[21]提出了一种多端直流系统的电压电流保护方案,其在方案中设计了一种“三取二”的表决器,解决低电压保护和过电流保护的可靠性问题。方案中的3个判据分别是故障电流的小波系数、故障电压的小波系数以及电压幅值和变化率。该方案能够通过比较小波系数或电压幅值变化率的大小确定故障线路的位置,对于保证选择性具有一定的意义。由于采用小波变化对信号进行了处理,该文献并未直接应用电压电流信号,并通过各区域信号的相对关系确定故障位置,部分解决了电压电流保护的灵敏性问题,但其整定值确定需要经过电磁暂态仿真确定,并不具备良好的工程应用前景。

电流/电压保护是基于单端电气量的保护原理,需要通过定值与时间的配合来保证选择性,对辐射状直流电网或其他对选择性要求不高的系统是一个性价比很高的选择;但是对于多端直流系统,特别是输电系统,其只能作为后备保护,与性能更好的主保护配合保证设备及系统的运行安全。

2.2 纵联保护

纵联保护,特别是电流差动保护,作为主保护广泛应用于高压交流输电系统中。在应用于LCC-HVDC系统时,电流差动保护不能区分直流输电线路故障电流和逆变侧交流系统故障而引入的100 Hz分布电容电流,需延时动作,从而失去了“全线速动”的特性,只能作为传统直流输电系统的后备保护。电压源型换流器件在故障暂态过程中迅速关闭,交流系统通过串联的续流二极管或由续流二极管组成的不控桥式整流电流与直流系统联系,馈入短路电流;且直流电容和健全线路的电容电流在故障初期远大于交流系统馈入的电流;因此在理论上,电流差动保护是可以应用于多端直流系统的,需要解决的只是判据形式的问题。

文献[20]介绍了一种基于采样值的电流差动

保护,其判据形式与基于相量的差动保护形式相同,均采用比率制动特性。判据中设置了参数 R 和 S 来保证可靠性,在由差动电流和直流电流组成的平面中,当轨迹中 R 个点中有 S 个进入了动作区,则判定为区内故障,否则,则判定为区外故障。

文献[22]提出了一种由电流“能量”构成的差动保护,将电流信号进行离散小波变换;并且变换后的小波系数在选定的时间窗内积分得到电流信号的“能量”,并参照电流差动保护的判据构建差动量和制动量,从而实现对区内故障的识别。

纵联方向保护是另外一种类型的纵联保护,在交流系统中通过判别被保护元件两端电流的方向来识别内部故障。由对柔性多端直流系统的故障特征进行分析可知,直流线路故障时直流电流具有明确的方向性^[22],故理论上纵联方向原理是可以应用于柔性多端直流系统的,所面临的无非是如何构建方向元件的问题。

文献[23-24]分析了基于电压源换流器的直流输电系统区内外故障特征的基础上,分别构建了基于波形相关性的纵联保护判据。区内故障时,两端换流器直流侧电流变化的方向是相反的,区外故障时,其变化方向相同。文献[23]采用就地判别方向的思想,在规定数据窗内对电流变化率求和,若其大于规定的(正)门槛,则表明电流是增加的,相反,若其小于规定的(负)门槛,则表明电流是减小的,通过比较电流变化的方向识别区内故障。文献[24]则通过直接计算两侧电流的时域相关系数识别区内故障。

综上,纵联保护的原理和思路可以直接应用于多端直流输电系统,但是在具体判据上会存在不同于交流的形式。必须指出的是,由于纵联保护需要在多个VSC换流站之间传输数据,其动作速度高度依赖于通信系统,是否能够满足柔性多端直流系统的需要尚需进一步的研究。

2.3 行波及暂态量保护

行波保护是目前高压直流输电线路广泛应用的主保护,其充分利用电力系统故障暂态波过程中的故障信息实现故障的检测和定位。暂态量保护一般利用故障暂态信号中的能量等信息检测并识别被保护元件的内部故障,虽未广泛应用,但一直是继电保护的研究热点。行波及暂态量保护所利用的信号或信息均不具备稳态特性,即其随时间衰减,在实际应用中的可靠性问题一直被广泛质疑,在将其应用于

柔性多端直流输电系统中的过程中,可靠性也是必须关注和着力解决的问题。

文献[25]提出了一种用于双端直流输电线路的行波保护原理。其考虑输电线路两端平波电抗器(LCC-HVDC)对行波传播的影响,利用区内外故障行波传播路径中是否存在平波电抗器作为故障定位的依据。该方案首先利用故障电压反行波的1模分量识别故障,并利用该分量的变化量区分区内、外故障,然后利用1模分量和0模分量数值相对大小选出故障类型,以实现故障隔离。

文献[26-27]同样利用直流输电电路上串接的电感元件对行波和暂态信号传播的影响构建保护原理。文献[26]采用电压变化率,即“微分欠压”的形式构建保护原理,而文献[27]则根据暂态过程中直流线路电抗器两端电压的相互关系识别故障和故障区域。需要说明的是,文献[25-27]给出的是典型的行波/暂态量保护判据的构建方式,其思想具有通用性。

文献[28]针对VSC-HVDC系统输电线路未装设电抗器的情形,考虑直流滤波器支路对不同位置故障暂态行波传播电路的频谱特性的影响,提出了一种基于固有频率的直流输电线路保护方案。该方案利用被保护元件区内、外故障时暂态(行波)信号的固有频率的差异,并与行波信号的暂态能量相配合实现故障的识别。

可见,对于行波和暂态量保护而言,其实质上都是在描述故障行波穿越“边界”的特性,这种边界可以是交流系统中的母线、故障点,也可以是直流系统中的平波电抗器和直流滤波器。借助于故障暂态行波信号在传播过程是否穿越“边界”所带来的幅值、频率、波形等信息来识别故障发生在区内还是区外,因此可以将这种保护方案均称之为“边界保护”。需要说明的是这类保护方案根据行波传播路径特征识别故障并进行故障定位,电压电流测量装置的安装位置对结构有决定性的影响,在实际应用中应给予考虑。

无论是故障行波的波过程还是电路的暂态响应,其均与故障的类型和严重程度密切相关,且随着电容电感等元件暂态过程的结束和消失,因此,行波和暂态量保护无法回避工程应用中的可靠性问题,这也是制约其应用的最关键因素。

除此电压/电流保护、纵联保护和行波/暂态量等高压直流输电系统应用的主流保护之外,国内外

学者针对多端直流输电系统还提出了直流距离保护^[29]、谐波保护^[30]、基于智能算法的保护^[31]等保护原理以及后备保护方案^[32-33]。这些原理和方案尚在不断的完善和发展中,待成熟后对提高多端直流输电系统的继电保护性能将发挥巨大的作用。

综上所述,柔性高压直流输电系统的故障识别与故障区域定位方法在可靠性、快速性等方面与电力系统的要求尚有一定的差距,深入研究柔性高压直流输电系统的故障特征,充分考虑其电路非线性、响应快速性、故障清除时间速动性、故障隔离范围选择性等特点和要求,构建新的保护体系和保护方案是非常有意义的研究方向。

3 多端直流系统的故障隔离策略

交流电网的故障隔离依赖断路器,简单实用。目前多端直流系统的故障隔离策略主要包括3种技术路线:采用交流断路器与直流隔离开关、采用不同类型的直流断路器以及采用具有故障阻断能力的换流器隔离故障。直流断路器技术尚未达到大规模工程应用的要求,目前的多端直流工程全部采用通过换流器交流侧断路器隔离故障的策略,动作时间长,且无选择性,在故障元件从直流系统中清除后换流器重启过程复杂,故障恢复时间长,不能满足多端直流系统运行的要求。

文献[34]研究采用交流断路器与直流快速隔离开关的故障隔离技术,在故障识别技术无法保证选择性的情况下,基于各换流器就地方向判别结果,提出了一种直流线路故障隔离的“握手原则”,若换流器出线电流为正方向则跳开相应的隔离开关,反之则不动作。由于其仅仅利用就地的方向判别来识别故障,则不可避免地造成健全线路某一侧的方向元件误动作,因此必须通过快速隔离开关的重合来纠正不正确动作,故障隔离时间无法保证。

文献[35-36]将这一原则推广到采用具有阻断特性的电压源型换流器多端直流电网中。文献[37]则在设计采用直流断路器的故障隔离方案中应用了“握手原则”。

文献[38]给出了一种适用于架空线路多端直流电网的保护方案,其重点考虑如何应对架空线路瞬时性故障的问题。文献中提出了基于半桥MMC+直流断路器和阻断型MMC两种保护策略。故障发生且断路器动作(阻断型换流器阻断)后,针对瞬

时性故障,设置了3次换流器重启动,若重启成功则系统成功进行了故障穿越可以继续运行;若重启失败则说明输电线路发生永久性故障,需要通过快速隔离开关隔离故障。对于半桥MMC+直流断路器方案,无论重启是否成功,均可以保证健全系统的稳定运行,而对于采用阻断型MMC的方案,若重启失败,则多端直流系统面临全停的风险,恢复过程需要较长时间。

此外,文献[12,39-41]从电压源的拓扑结构和控制策略方面对具有阻断特性的换流器进行了研究,以期能够通过改进换流器的性能解决直流电路故障阻断时间长和阻断能力不足的问题。文献[42-45]从实际工程出发,介绍了目前实际柔性多端直流输电工程的保护配置和运行情况,并从电力系统运行的角度为保护原理和故障隔离策略的研究提出了建议。

综上所述,多端直流系统直流线路故障的隔离方案可以简单地分为换流器停电和换流器不停电两种。换流器停电方案包括采用交流断路器切断交流侧向直流侧馈入的短路电流以及通过换流器自身阻断交流侧向直流侧馈入的短路电流;换流器不停电方案则通过直流断路器隔离故障,隔离过程迅速且不影响系统健全部分的运行。显然,采用直流断路器的方案更符合多端直流系统运行的要求。在直流断路器不成熟的情况下,若采用换流器停电方案,除考虑阻断时间和阻断能力外,还应考虑如何在无选择性停电之后迅速恢复的问题,在此情况下如何缩短放电后的直流电容再充电的过程显得尤为重要。

4 结论与展望

快速性、选择性、灵敏性和可靠性是电力系统对继电保护的基本要求,多端直流系统的故障识别原理与隔离方案的研究也必须遵循这一基本原则。虽然国内外学者已经进行了大量的研究,但多端直流系统故障识别的快速性与故障隔离的选择性问题仍然未能得到解决。无选择性地切除故障必然带来健全系统恢复的问题,虽然基于直流断路器的方案能够解决快速恢复的问题,但其技术尚不成熟;而基于逆变器停电的故障隔离方案则无法保证系统健全部分的快速恢复,不能满足电力系统的运行要求。

1) 在继电保护的原理方面,目前多端直流系统的故障识别问题已有多种解决方案,并在双端直流

输电系统中广泛应用。但是,对于多端直流系统,仅仅可靠灵敏地识别故障并不能够满足电力系统运行的要求,尚需要对故障发生元件进行识别和定位。从目前的文献来看,直流保护原理的选择性通常通过以下3种形式实现:定值与延时的配合,其无法保护直流线路全长,且无法满足柔性直流系统故障隔离快速性的要求;采用基于通信的纵联保护方案,通信系统的速度和可靠性制约故障隔离的速度和可靠性;依赖行波及暂态量信息进行边界识别,灵敏性不足,实际应用中也存在可靠性的问题。

因此,跳出传统交流继电保护方案的束缚,充分研究多端直流系统的结构特征、控制策略以及故障特征,并在此基础上构建新的继电保护方案可能是需要重点关注的问题。

2) 在故障隔离方面,进一步加大直流断路器产品化、实用化研究的基础上,充分考虑换流器的阻断能力,着重研究并提出具备快速重启特性的阻断型换流器是解决多端直流电网故障清除选择性和故障恢复快速性的一个渠道。

3) 重视测量环节可靠性与精度对故障识别与故障隔离的影响。测量环节是继电保护的重要组成部分,测量环节的可靠性将直接影响到故障识别和故障隔离的可靠性,由于测量环节导致的直流系统停运事故层出不穷^[46]。在交流系统的保护中,通过TA饱和识别、TA和TV断线识别来闭锁保护,防止由于测量环节造成的继电保护不正确动作,多端直流系统中尚未见到相关文献和算法,测量环节与通信环节的可靠性问题及其对多端直流系统继电保护的影响值得关注。

参考文献

- [1] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- [2] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [3] 马钊,周孝信,尚宇炜,等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.
- [4] Jie Yang, Jianchao Zheng, Guangfu Tang, et al. Characteristics and Recovery Performance of VSC-HVDC DC Transmission Line Fault[C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific: 1-4, 2010.

- [5] E. M. Kontos. Control and Protection of VSC – based Multi – terminal DC Networks [D]. Delft University of Technology ,2013.
- [6] S. Le Blond ,R. Bertho ,D. V. Coury ,et al. Design of Protection Schemes for Multi – terminal HVDC Systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,2016 (56) : 965 – 974.
- [7] Jin Yang ,J. E. Fletcher ,J. O'Reilly. Short – circuit and Ground Fault Analyses and Location in VSC – based DC Network Cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics ,2012 ,59(10) : 3827 – 3837.
- [8] Rainer Marquardt. Modular Multilevel Converter Topologies With DC – short Circuit Current Limitation [C]. The 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia ,Jeju ,Korea: IEEE ,2011: 1425 – 1431.
- [9] Xue Yinglin ,Xu Zheng ,Tang Geng. Self – start Control With Grouping Sequentially Precharge for the C – MMC – based HVDC System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2014 ,29(1) : 187 – 198.
- [10] Qin Jianchao ,Saeedifard M ,Rockhill A ,et al. Hybrid Design of Modular Multilevel Converters for HVDC Systems Based on Various Submodules Circuits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2015 ,30(1) : 385 – 394.
- [11] Li Xiaoqian ,Liu Wenhua ,Song Qiang ,et al. An Enhanced MMC Topology With DC Fault Ride – through Capability [C] // 39th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society ,Vienna: IEEE ,2013: 6182 – 6188.
- [12] 李斌 李晔 何佳伟. 具有直流故障清除能力的 MMC 子模块关键性能研究 [J]. 中国电机工程学报 ,2016 ,36(8) : 2114 – 2122.
- [13] E. Kontos ,R. T. Pinto ,S. Rodrigues ,et al. Impact of HVDC Transmission System Topology on Multiterminal DC Network Faults [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2015 ,30(2) : 844 – 852.
- [14] Int. Electrotech. Comm. High – voltage Direct Current (HVDC) Transmission Using Voltage Sourced Converters (VSC) [R]. IEC Tech. Rep. TR – 62543 ,2011.
- [15] M. Callavik ,A. Blomberg ,J. Hafner ,et al. The Hybrid HVDC Breaker: An Innovation Breakthrough Enabling Reliable HVDC Grids [R]. ABB Grid Systems ,Tech. Rep ,Nov. 2012.
- [16] 赵晓君. 高压直流输电工程技术(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社 ,2011.
- [17] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 ,2010.
- [18] Mesut E. Baran ,Nikhil R. Mahajan. Overcurrent Protection on Voltage Source Converter Based Multi – terminal Distribution Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2007 ,22(1) : 406 – 412.
- [19] Lianxiang Tang ,Boon – Teck Ooi. Protection of VSC – multi – terminal HVDC against DC Faults [C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference ,2002.
- [20] Zaibin Jiao ,Zhao Wang ,Xiaobing Wang ,et al. Protection Schemes for Distribution Lines in DC Power Grid [C]. IEEE Innovative on Smart Grid Technologies – Asia (ISGT ASIA) ,2015.
- [21] K. De Kerf ,K. Srivastava ,M. Reza ,et al. Wavelet – based Protection Strategy for DC Faults in Multi – terminal VSC HVDC Systems [J]. IET Generation , Transmission and Distribution ,2011 ,5(4) : 496 – 503.
- [22] A. E. B. Abu – Elanien ,A. A. Elserougi ,A. S. Abdel – Khalik ,et al. A Differential Protection Technique for Multi – terminal HVDC [J]. Electric Power Systems Research ,2016 ,130: 78 – 88.
- [23] Yanting Wang ,Baohui Zhang ,Fei Kong. A Directional Comparison Pilot Protection Scheme for Hybrid HVDC Transmission Lines [J]. The 5th international conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies ,2015.
- [24] 金吉良. 考虑交直流系统相互影响的交流过电压保护及直流线路纵联保护的研究 [D]. 西安: 西安交通大学 ,2016.
- [25] Ying Zhang ,Nengling Tai ,Bin Xu. Fault Analysis and Traveling – wave Protection Scheme for Bipolar HVDC Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2012 ,27(3) : 1583 – 1591.
- [26] W. Leterme ,J. Beerten ,D. V. Hertem. Nonunit Protection of HVDC Grids with Inductive DC Cable Termination [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,2016 ,31(2) : 820 – 828.
- [27] Jian Liu ,Nengling Tai ,Chunju Fan. Transient – voltage Based Protection Scheme for DC Line Faults in Multi – terminal VSC – HVDC System [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,DOI 10. 1109/TPWRD. 2016. 2608986.
- [28] Zheng – you He ,Kai Liao. Natural Frequency – based Protection Scheme for Voltage Source Converter – based High – voltage Direct Current Transmission Lines [J]. IET Generation , Transmission and Distribution ,2015 ,9(13) : 1519 – 1525.
- [29] J. Suonan ,J. Zhang ,Z. Jiao ,et al. Distance Protection

for HVDC Transmission Lines Considering Frequency-dependent Parameters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3): 723 - 732.

[30] Xiaodong Zheng, Nengling Tai, Zhongyu Wu, et al. Harmonic Current Protection Scheme for Voltage Source Converter-based High-voltage Direct Current Transmission System [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2014, 8(9): 1509 - 1515.

[31] Ramesh M, Laxmi AJ. Fault Identification in HVDC Using Artificial Intelligence——Recent Trends and Perspectives [C]. Proceedings of international Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2012: 1 - 6.

[32] W. Leterme, S. P. Azad, D. V. Hertem. A Local Backup Protection Algorithm for HVDC Grids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1767 - 1775.

[33] S. P. Azad, W. Leterme, D. V. Hertem. Fast Breaker Failure Backup Protection for HVDC Grids [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 138: 99 - 105.

[34] Tang L X, Ooi B T. Locating and Isolating DC Faults in Multi-terminal DC Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877 - 1884.

[35] 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.

[36] 罗永捷, 李耀华, 李子欣, 等. 多端柔性直流输电系统直流故障保护策略 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12): 1 - 6.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 李斌, 李晔, 何佳伟. 基于模块化多电平换流器的直流系统故障处理方案 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1944 - 1950.

[40] 孔明, 汤广福, 贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5343 - 5351.

[41] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2681 - 2694.

[42] 王俊生, 傅闯, 胡铭, 等. 并联型多端直流输电系统保护相关问题探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4923 - 4931.

[43] 时伯年, 赵宇明, 孙刚. 柔性直流配电网保护方案研究及实现 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 11 - 16.

[44] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133 - 139.

[45] 董云龙, 凌卫家, 田杰, 等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169 - 175.

[46] 滕予非, 汤勇, 汪晓华, 等. 特高压直流输电工程直流分压器动态特性及其引起的误闭锁机理研究 [J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2646 - 2653.

(收稿日期: 2016 - 10 - 06)

(上接第 54 页)

[3] 解婷, 汤广福, 郑健超, 等. 高压直流晶闸管阀故障电流下反向电压特性的分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 140 - 145.

[4] Karady G, Gilsing T. The Calculation of Transient Voltage Distribution in a High Voltage DC Thyristor Valve [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1973, 92(3): 893 - 899.

[5] 郭焕, 温家良, 汤广福, 等. 高压直流输电晶闸管阀关断的电压应力分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(12): 1 - 6.

[6] Karady G, Gilsing T. The Calculation of Turn-off Over Voltages in a High Voltage DC Thyristor Valve [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, 1972, 91(2): 565 - 574.

[7] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 串联晶闸管反向恢复暂态过程的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(16): 15 - 19.

[8] 邹刚, 陈祥训, 郑健超, 等. 用于电力电子系统暂态过程分析的晶闸管宏模型 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(6): 1 - 5.

[9] Shammass NY, Rahimo MT, Hoban PT. Effects of External Operating Conditions on the Reverse Recovery Behaviour of Fast Power Diodes [J]. European Power Electronics and Drives Journal, 1999, 8(2): 11 - 18.

[10] Frederick MM, Harold JR. The Recovered Charge Characteristics of High Power Thyristors [J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1976, 12(3): 305 - 311.

作者简介:

刘隆晨(1987), 博士, 主要从事高压直流输电技术和放电等离子体应用的研究。

(收稿日期: 2016 - 09 - 21)