

[配电网]

直流配电网继电保护研究综述

文/东莞理工学院 张 硕 张兆云
广东工业大学 王星华

研究直流配电网的故障情况及继电保护有利于促进直流配电网的可靠稳定运行,对城市配电网的建设具有重要意义。概述了国内直流配电网继电保护的研究现状,总结了国内在直流配电网的故障特征、保护原理和保护配置等方面的相应研究,并对直流配电网继电保护技术的研究方向进行展望。

近年来,越来越多的直流电源和直流负载被投入到实际运行中,这些直流装置在为人们带来便利的同时,也给交流配电网带来严重的影响。直流装置需要通过电力电子设备换流后,才能与交流电网互联,而电力电子设备的运用导致交流电网中含有大量的谐波。所以,具有电能质量好、无须无功补偿且线路损耗小等优点的直流配电网,更有利于分布式电源发挥其价值,未来发展的潜力非常大。对于直流微电网这个新生事物,国内外在直流配电网的拓扑结构、控制方式和经济调度等方面进行了一些研究,并取得了一定成果。

在进行理论研究的同时,国内也进行了一系列直流配电网的示范工程。目前国内已建成包括深圳宝龙直流配电网示范工程在内的多个直流配电网示范项目,在直流配电网中,各类直流电源和直流负载通过DC/DC适配器与电网互联。直流配电网与交流配电网的运行特性差别较大,相比交流系统,直流配电网保护与直流配电网的拓扑结构、换流阀结构、系统控制方式及直流断路器的配置方式等密切相关。

直流变压器是直流配电网的核心设备,主要用于中压和低压直流的转换,实现不同电压等级电源和负载之间的电隔离,达到直流并网、储能接入以及负载配电的目的。直流变压器的继电保

护研究是直流配电网继电保护研究的重点之一。

故障特征

直流配电网故障特征的研究是直流配电网继电保护研究的基础,国内外学者对故障特征已经开展了部分研究。直流配电网的故障类型主要包括极间短路故障和单极接地故障;同时直流变压器是直流配电网的核心设备,其故障特征需要单独分析。

1. 极间短路故障分析

直流系统故障中非常严重的情况就有直流侧极间短路故障,如图1所示。

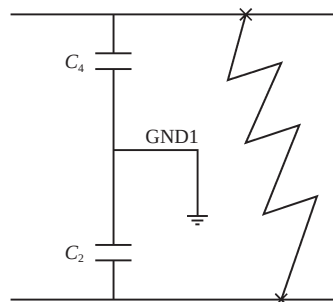


图1 极间短路故障回路

故障开始的时候,电容放电为故障电流。直流故障电流迅速上升,而电压则快速下降;待电容电压降到为零时,故障电流不断下降,最后,故障过程将进入不控整流稳态阶段。

基金项目:广东省科技计划资助项目(2017A010104023);国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903205)资助

2. 单极接地故障分析

在图2单极接地故障的情况下可以看出, IGBT在发生故障时, 可以作用让自身关断。

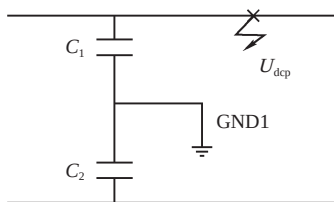


图2 单极接地故障电路图

故障初期, 交流相电压会比故障极 U_{dcp} 电压小, 电容放电电流作为故障电流。在正极发生故障时, 电容将与故障线路、过渡电阻组成放电回路 U_{dcp} 造成振荡衰减, 而与负极相连的电容电压 U_{dcp} 则会随着 U_{dcp} 的衰减而振荡增大。

3. 模块化多电平直流变压器(MMC)故障分析

子模块故障是换流器的主要内部故障, 子模块不仅承担了支持直流电压的作用, 而且里面全控器件的开关可以决定交流测输出电压的波形质量。下面列举了一些造成子模块故障的原因。

1) 电力电子器件损坏。电力电子器件的过载能力不足, 器件很容易会被过电压、过电流甚至过大的电流上升率造成损坏。

2) 对储能电容的损害。电容是无源元件, 其过载能力比电力电子器件强。所以, 电力电子元件故障的概率会比电容高。

3) 触发控制发生故障。不能准确接收到触发信号, 导致子模块不能正常工作。

综上所述, 直流配电网的故障特性和传统的交直流电网差别很大。首先, 系统的稳态故障特征会受到直流电网中的电力电子设备的控制影响, 尤其是限流控制可以把故障电流最大值限制住, 这样一来不同点短路故障测量得到的电流大小可能相等; 其次, 在直流设备中, 存在大量的滤波电容和滤波电感, 电容和电感的存在对于故障的暂态特性也影响较大, 特别是电容的快速放电对于暂态特性影响很大。

保护原理

根据直流配电网故障特征, 选择适合于直流电网的保护原理也是当前的研究热点。与此同时, 直流配电网故障测距和选线是继电保护的重要辅助功能。

1. 电压/电流保护

电压/电流保护可以根据电流、电压幅值以及变化率的变化情况来识别故障区间。

总体而言, 电压/电流保护是一种原理简单且可靠性高的保护, 可以作为直流配电网的后备保护。电压, 电流保护主要缺点包括受系统运行方式影响大, 且部分电力电子设备关断过快, 有可能使得故障时故障电流有限, 影响保护的動作行为。如果直流配电网本身不过于强调选择性和速动性, 电压/电流保护也可以作为直流配电网的主保护。

2. 边界保护

边界保护方面的研究通常在直流输电领域开展, 但对于配电领域仍具有一定的适用性。根据电抗器不同侧电压变化率有不同的保护原理, 可将线路侧电压变化率当作保护判据, 但该原理不够全面, 缺少了对交流阀侧断路器的研究; 故障极点可由电压变化率、零模分量大小等来确定, 但该方法并未考虑到雷电干扰情况下的识别。

利用高频暂态能量的差异作为判据的保护原理, 虽然动作速度快, 但针对不同故障类型的保护整定值没有统一标准; 计算线路侧与母线侧的暂态电压比值后, 通过比值来找出故障线路, 当故障电阻较大时, 无法识别出直流线路故障。

总体而言, 边界保护是直流电网保护的研究重点, 可以作为直流配电网的主保护。但是边界保护之前都为高压电网所特有, 保护构成复杂, 若要推广到配电网领域, 需要对其进行简化, 降低成本, 使之适用于配电网的发展。

3. 差动保护

把线路两端的差动电流大小或者电流方向不同的特征相比较, 识别线路故障发生区域就是差动保护的原理。

设置传感器在线路上, 比较相邻传感器差动电流大小和变化率, 以此确定故障区间, 但是成本会偏高; 单极接地故障可把电压不平衡度当作启动的判据, 故障定位可用电流差动保护。小电流接地系统故障时, 准确性不够, 利用暂态差流短时能量作为保护判据, 小电流接地时, 无论是故障还是非故障线路, 它们的电流暂态量不明显。

差动保护是原理最可靠的保护之一, 在高可靠性直流配电网中将起到重要作用。

4. 故障测距

故障测距是继电保护装置的一个重要辅助功能, 直流配电网的故障测距一般包含行波测距

法、故障分析法和信号注入法。这些方法对于直流配电网故障分析都有启示作用。

1) 行波测距法。采用单端行波故障测距法,利用行波第一次到达测量端与其反射回到测量端的时间差来完成故障测距。如图3所示。

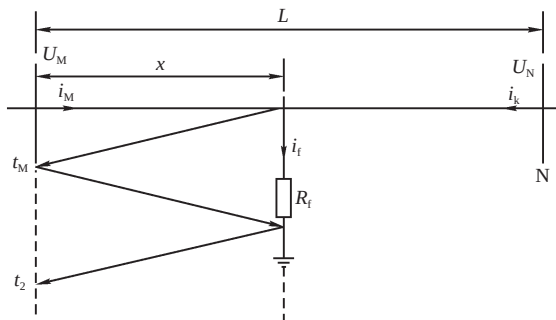


图3 单端行波故障测距示意图

2) 故障分析法。运用时域解微分方程法来完成故障测距,原理简单,计算量小,而且所需的故障电气量可直接获得,但过渡电阻对结果影响较大;通过双端电流谐波量的分析方法,直流配电网线路发生故障后,暂态电流中将包含一些高频分量。不过双端电气量的故障测距不得不借助通信技术获得数据信息,因此即使微小的时间差也会带来巨大的误差;利用测量故障极线路两端的直流电抗器电压进行故障测距的方法,由于技术的原因,测距误差还需要减小。

3) 信号注入法。在直流断路器的故障被切除后,注入附加信号然后检测附加信号便可得到故障距离。如果故障数据较少、故障暂态特征复杂,会使故障测距准确度得到提高;将测距模块作为线路故障的信号源,但采用频率较高;基于直流断路器的探针注入法的双端直流配电网双极短路故障测距,不过其所需数据窗长度较长。

5. 故障选线

正极接地故障时,电压波就会偏离正常轴线值,而且偏离的程度远大于负极;负极故障,情况却相反;双极短路故障时,两极偏离的程度差不多相同。不同类型换流器单极短路故障情况,可以控制暂态放电脉冲,完成故障选线。暂态电流不受系统接地值的影响,故障选线准确度较高。新的获取电气量微分项的方法以及提高算法数值稳定性的办法,利用常规采样率即可快速准确地识别故障线路。该方法所需采样频率低、计算量不大。

保护配置

在直流保护配置方面,国内已经进行了初步研

究并对其保护配置标准化进行了探索。由南方电网科学研究院牵头制定的中国电机工程学会标准《直流配电网用直流控制与保护设备技术要求》对直流配电网的保护提出了基本的技术要求。如下表所示。

1. 换流端保护区

1) 交流连接线保护区域:包括交流引线至桥臂电抗器网侧之间的所有设备。

2) 换流器保护区域:包括桥臂电抗器网侧至直流线路母线之间的所有设备。

3) 直流极保护区域:包括换流器直流侧出口母线、直流线路以及直流开关等设备。

换流端区保护可根据系统情况选择配置以下保护功能:桥臂过电流保护、桥臂电抗器差动保护或换流器差动保护。

2. 直流固态变压器保护区

1) 连接线保护区域:包括直流固态变压器负荷侧直流引线至用户侧之间的所有设备。

2) 直流固态变压器本体保护区域:包括直流固态变压器本体及其所有附属设备。

3) 直流极保护区域:包括直流固态变压器直流侧出口母线、直流线路以及直流开关等设备。

直流固态变压器保护区可根据系统情况选择配置如下保护功能:直流连接母线差动保护、直流连接母线过电流保护或直流配电网接地过电流保护。

表 直流配电网保护配置

联接变压器 区域	电压源换流器 区域	直流线路 区域	直流变压器 区域
联接变压器 过电流保护	桥臂电抗器 差动保护	直流线路 差动保护	直流母线 差动保护
交流连接母线 接地保护	桥臂差动保护	直流电压 不平衡保护	直流欠压 过电流保护
交流欠电压 保护	桥臂过电流保护	直流欠压 过电流保护	直流欠压 过电流保护
交流过电压 保护	阀直流过电流 保护	直流过电压 保护	直流过电压 保护
直流系统接地 过电流保护		直流欠电压 保护	直流欠电压 保护
		直流过电流 保护	低压母线 过电流保护

3. 直流线路保护配置

电流变化率 di/dt 、电流变化量 ΔI 以及电流方向为保护判据。其判据整定式(1)所示。

$$\begin{cases} dI_{dset1} = k_{rel1} dI_{dcmin} \\ \text{电流方向为正} \\ \Delta I_{dset1} = k_{rel2} \Delta I_{dcmax} \end{cases} \quad (1)$$

式中, dI_{dset1} 是启动判据门槛值; ΔI_{dset1} 是动作跳闸门槛值; dI_{dcmin} 是线路故障时出现的最小值; ΔI_{dcmax} 是在延时 t 内区外故障时可能出现的最大电流增量值。考虑可靠性、器件耐受最大电流值和线路

(下转第49页)

可视化通过SVG技术来实现,保证电子系统在正常运行过程中,采集到相关的数据,比如电流及负荷数据等。而数据安全方面指的是相关信息通过计算的方式来解析电力系统,以科学的方式来排除电路故障,从而保障电力系统安全、稳定的运行。再者,电力系统的动态电网可视化技术指的是电力系统在运行的过程中,对系统中的数据和信息进行动态的分析和采集,从而保障电力系统高效安全的工作。同时,电力系统内部的信息可以在可视化技术支持下,借助PMU数据来运行,对信息数据实现动态监控,数据所反映出的系统工作模式、运行情况可以支持PMU数据正常运行,更好地达到可视化技术的实时控制和监督。

4. 知识表现技术的应用

知识表现技术是可视化技术中一个重要的功能技术,在电力信息系统运维过程中,知识表现技术可以利用电力系统的终端来呈现数据和信息,对信息系统、软硬件运行各项指标进行分析,反馈出

来的信息和数据可以为电力运维工作人员提供重要的依据。其次,知识表现技术可以深入地挖掘系统中隐藏的数据和信息,从而确保数据的准确性。在电力信息通信运维中,知识表现技术可以优化和升级运维系统,使其在应用的过程中更加高效可靠。

结束语

可视化技术在电力信息系统运维中是非常重要的,它不仅可以创建可视化系统,还可以提升管理能力。通过专业化的监控模式,实施全面信息系统监测,从而提高电力工程的施工质量和水平,更好地提升运维工作效率,促进我国电力行业快速发展。目前,我国的可视化技术在电力系统运维中还处于研究阶段,需要不断地优化和升级,提升可视化系统的稳定性和安全性,更好地发挥出可视化技术的作用和价值。EA

(收稿日期:2019.09.16)

(编辑:朱金凤)

(上接第41页)

间保护的配合等因素, k_{rel1} 取0.6~0.8, k_{rel2} 取1~2。

直流线路保护跳闸的判据是电流变化量,因此,校验灵敏性如式(2)所示。

$$k_{sen} = \frac{\Delta I_{dcmin}}{\Delta I_{dset1}} \quad (2)$$

式中, ΔI_{dcmin} 是故障发生时延时t时刻的最小电流值增量; k_{sen} 一般不小于1.2。

4. 直流母线保护配置

电流突变量方向可使直流母线保护判断是否有故障发生。当电流突变量方向在延期内被判定为负时,保护就会开始动作。所以,不需进行数值整定。

目前全球在保护配置方面的研究才稍有起色,而且直流电网的推广也还没有普及,还需要进行深入的研究与分析。在直流设备保护方面,过去将保护和控制一体化;但是随着直流设备的数量增加、组网结构复杂化,对于直流电网配置一套独立的不依赖于控制系统的继电保护系统是必不可少的。

结束语

直流配电网继电保护方面的研究虽已取得一些成果,但仍然存在许多急需解决的问题。

1) 直流配电网故障分析方面。因为直流配电网中含有大量的受控型电力电子器件,其故障特

征不再是传统电网的由物理特性所主导的过程,反而转变为由设备控制特性以及大容量电容充放电等所主导的过程。

2) 直流配电网保护原理方面。直流配电网的故障特点给保护配合带来了很大困难,需要随着直流配电网的建设不断完善,同时目前尚没有比较精确的故障定位技术和完善的保护方案。

3) 直流配电网保护配置方面。保护配置研究正起步,随着电网结构的复杂化,亟需形成一套独立的保护系统。

直流配电网在消纳分布式电源,提高能源利用率方面有巨大优势。直流配电网继电保护是制约其发展的重要因素之一,国内外对于这方面的研究还处于起步阶段。在可见的未来,配电网的构建有了统一的划分标准,直流配电网故障特征分析转变为从控制特性所主导入手,研究出较为可靠的故障定位技术、保护方案以及形成一套独立的保护系统,整个电网系统将会更加稳定可靠,为用户提供的供电质量更加高效优化。所以对于直流配电网继电保护的研究任重道远,对人类社会的发展具有重大的意义!EA

(收稿日期:2019.10.09)

(编辑:朱金凤)