

高压直流输电线路故障清除及恢复策略研究综述

蔡 静^{1,2}, 董新洲^{1,2}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 高压直流输电线路故障后的快速清除和恢复对整个系统的稳定、可靠运行至关重要。文中分析总结了现有基于电网换相换流器的高压直流(LCC-HVDC)系统和基于电压源型换流器的高压直流(VSC-HVDC)系统中直流线路故障清除及恢复策略。指出现有策略中存在盲目恢复的不足,会对整个系统造成更大的冲击或者不必要的停运。提出了一种可能的解决方案:在不同直流输电系统中展开直流输电线路故障自适应恢复研究,实现直流输电系统的安全、快速恢复,完善直流线路故障综合处理方案。

关键词: 高压直流输电; 直流线路故障清除; 直流线路故障恢复; 自适应恢复; 自适应重启; 自适应重合闸; 自适应解锁

0 引言

近年来,直流输电技术以其线损小、输送距离远、输送容量大、无需同步运行、可以快速调节功率等巨大优势,在跨区域送电、各大电网互联、分布式能源接入、孤岛供电以及大城市供电等领域得到了广泛的应用^[1-4],中国电网逐渐呈现出“强直弱交”的特性^[5]。架空输电线路暴露在空气中,工作条件恶劣,是整个输电系统中发生故障概率最高的元件^[6],直流线路发生故障会危害电气设备的安全运行,中断功率的正常传输,直流系统闭锁、停运会引发系统电压和频率稳定问题甚至造成大停电^[7-8]。所以直流输电线路故障后的处理,包括故障清除和恢复,对保障设备安全、提高供电可靠性、维持整个系统的稳定性尤为重要。

基于电网换相换流器的高压直流(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)输电技术采用半控型电力电子器件,基于电压源型换流器的高压直流(voltage sourced converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)输电技术采用全控型电力电子器件,二者结构、运行原理、直流线路故障后的电气特征及系统控制特性不同,采用的故障处理策略

也不同。但是二者处理故障的思路基本类似:对于瞬时性故障,当故障被认为清除后,会采取合适的恢复方法,用以在瞬时性故障清除后快速恢复输电系统正常运行;对于永久性故障,则不进行恢复。

在 LCC-HVDC 传统直流输电中,利用换流器的控制特性,通过直流线路故障重启动功能来实现故障的清除和系统的快速重启^[1]。重启动功能包括移相、去游离、重启 3 个阶段,但是否重启、重启时间设定等需要结合实际工况认真商榷^[9-10]。

在 VSC-HVDC 系统中,通过闭锁换流器和跳开交流断路器的方法来清除直流线路故障,但是清除故障和系统恢复所需要的时间均较长,大大限制了柔性直流输电技术的进一步发展。对此,国内外展开了关于直流断路器、具有故障自清除能力子模块和增加辅助电路的研究^[11]。

不管是 LCC-HVDC 系统还是 VSC-HVDC 系统,为了快速恢复供电,会在故障清除、等待一定的去游离时间后分别进行直流线路重启、断路器重合或者换流器解锁,这些恢复策略都是盲目的。对于绝大多数瞬时性故障,它能够快速清除故障且恢复供电,但是对于永久性故障,系统的恢复必然失败并停运,对整个供电网络造成更严重的二次冲击,造成比“线路故障”以及“故障清除之后不恢复”还要大的风险和后果;对于尚未完全清除或绝缘未完全恢复的瞬时性故障(统称为“复杂瞬时性故障”),也会造成恢复失败,进而导致系统停运。后文将绝大多数瞬时性故障、永久性故障及复杂性瞬时性故障称为不同的“故障状态”。

收稿日期: 2018-09-06; 修回日期: 2019-01-10。

上网日期: 2019-04-03。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600, 2016YFB0900604)。

本文对以上 2 类直流输电系统中直流线路故障清除及恢复策略进行梳理和总结,分析了现有策略存在的不足及其可能造成的后果,为后续研究明确了方向。特别地,针对 2 种直流输电线路“盲目恢复”提出了初步的直流输电线路自适应恢复方案,包括识别瞬时性故障和永久性故障,结合实际可能的去游离时间优化恢复时间等。

1 LCC-HVDC 直流线路故障清除与恢复策略

1.1 直流线路故障重启动功能

交流输电线路发生的故障多数是瞬时性的,约占线路总故障次数的 60%~90%,为了提高供电的连续性、可靠性,采用交流断路器跳闸后再自动重合的方法来清除故障和恢复运行^[12-13]。断路器跳开后,故障被隔离,故障电流在过零点能自动熄灭。对于瞬时性故障,经过一段时间后线路绝缘恢复,重合断路器即能恢复供电;对于永久性故障,由于故障仍然存在,断路器重合后保护再次动作,断路器再次跳开,不再重合。

直流输电线路瞬时性故障的概率也高达 90%^[6]。但是如果仍通过交流侧断路器隔离故障需要经历闭锁换流器—跳开交流断路器—等待去游离时间—重合交流断路器—解锁换流器等过程,从故障发生到系统恢复需要几秒甚至更长时间,可能会造成系统频率的大幅下降、电压波动、健全线路长时间过负荷运行等问题,影响电能质量,不利于系统的稳定;直流故障电流没有自然过零点,不能自行熄灭,能直接开断直流故障电流的直流断路器技术尚未完全成熟^[12],所以 LCC-HVDC 系统不采用断路器来处理直流线路故障。在图 1 所示的 LCC-HVDC 系统结构图^[1]中,平波电抗器 L、直流滤波器(DCF)组等结构可以起到一定的限流作用,换流器采用的低压限流控制、触发角控制等控制方式可以限制并清除故障电流^[11,13],并且更灵活、响应更快速。所以在 LCC-HVDC 系统中,通过控制系统的直流线路故障重启动功能(DC-line fault recovery sequences,DFRS)来实现故障的清除及恢复^[1,14]。图 1 中 S 表示交流电源,ACF 表示交流滤波器,T 表示换流变压器,LCC 表示电网换相换流器,DCL 表示直流输电线路。

DFRS 的执行过程可以分为移相、去游离和重启 3 个阶段^[1],流程图如图 2 所示,其中 N 为最大重启次数, I_{DC} 为直流线路电流, V 为直流线路电压, V_{min} 为判断重启是否成功的电压阈值, t_s 为采样时间, t_{max} 为判断重启是否成功的等待时间。

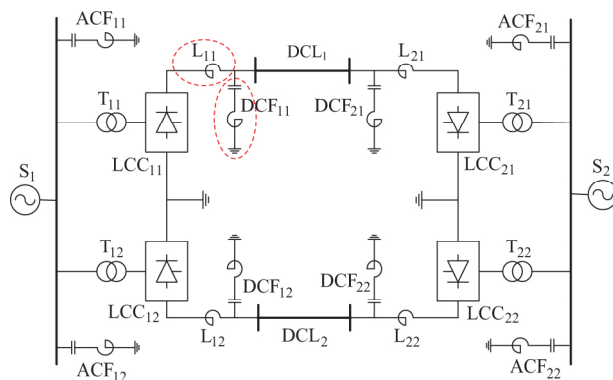


图 1 LCC-HVDC 系统结构
Fig.1 Structure of LCC-HVDC system

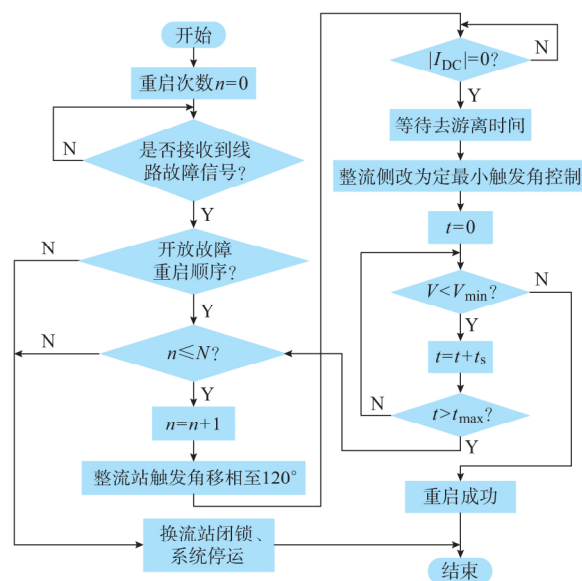


图 2 DFRS 流程图
Fig.2 Flow chart of DFRS

1)移相。控制保护系统接收到线路故障信号后,将整流侧触发角紧急移相为 120° ,阀控系统保持脉冲的正常触发,即将整流站变为逆变状态运行,储存在直流系统中的能量通过两端的换流器被送回到交流系统中,直流电流迅速降低。

2)去游离。当直流电流下降到零后,经过预设的去游离时间,使故障点绝缘恢复。

3)重启。整流侧去除移相信号,改变为最小触发角控制,恢复到整流状态运行,若故障已经消失且故障点绝缘已经恢复,在控制系统的作用下直流电流开始增大,直流电压开始上升,最终都稳定在设定值,重启成功;若因绝缘未恢复导致重启过程中再次发生故障,或者故障尚未消失,直流电压将无法重新建立,重启失败。

在系统允许多次重启的情况下,重复上述移相—去游离—重启过程,直到重启成功;若达到最大

重启次数仍重启失败,则判定为永久性故障,控制保护系统会启动闭锁顺序将直流系统停运,安全稳定控制在接收到换流器闭锁信号后根据实际情况,采取切机、切负荷等措施维持系统稳定^[15]。

1.2 直流线路故障重启动功能设置

上述过程中,去游离时间、重启次数、重启电压等级都可以根据实际工程需求和运行经验进行设置^[7,16]。去游离时间一般设置为 100~500 ms,重启次数可以设置为 0~5 次,重启电压可以为全压重启、80%降压重启或者 70%降压重启。从第二次重启开始,为了提高重启成功率,可以适当增加去游离时间,或者降低重启后的电压水平。一般来说,一次重启所需时间约为 500 ms,重启动恢复功率传输的时间比正常的系统启动需要的时间短很多。

在实际工程中,故障重启动功能是否投入及其参数设置还与系统运行方式、连接的交流系统强弱、故障情况等有关。对于双极运行的系统,如果两极独立进行故障重启动功能控制,当两极同时故障或者在很短时间内相继故障后,两极会同时重启或在很短时间内相继重启。由于直流输电工程传输容量大,这对整个系统而言是很大的功率扰动,如果重启失败更是会对系统造成更大的冲击,增加了系统失稳的风险。因此,对于双极运行的系统,两极的故障重启动功能必须进行协调配合,防止两极同时或相继重启^[7,16-17]。

1) 单极线路故障允许重启。

2) 一极线路故障重启期间,禁止另一极的直流线路故障重启。若此时另一极线路故障,直接闭锁故障极或者闭锁双极。

3) 一极线路故障重启成功,经过一定时间延时 t_1 后,才开放另一极的直流线路故障重启动功能。

4) 在一极紧急停运或因线路故障重启不成功闭锁后,经过一定时间延时 t_2 ,等电网扰动平息后才允许投入另一极的直流线路故障重启动功能。

其中, t_1 和 t_2 均可根据系统要求进行设置和调整。

孤岛运行的系统对线路故障重启动功能的投入提出了更严格的限制^[10,17]。

1) 仅在双极运行方式下允许线路故障重启,且单极线路故障仅允许重启一次,重启失败则闭锁故障极。

2) 单极线路故障重启成功一段时间 t 内,另一极线路发生故障,直接闭锁故障极;若故障间隔时间大于 t ,故障极允许重启一次。

1.3 LCC-HVDC 直流线路故障重启动功能存在的不足

文献^[7,14,16]结合实际运行中出现的通信干

扰问题、两极重启动功能协调配合问题提出了优化方案。从运行情况看,DFRS 利用了直流系统的可控性,多次在直流故障后将直流线路重启动成功,降低了瞬时性故障下直流闭锁的概率,提高了输电的可靠性和可用率^[2]。但是由于重启动之前缺少对故障状态进行判断的环节,线路恢复是盲目的,不能完全实现“瞬时性故障下线路快速恢复运行,永久性故障下直接闭锁”的目标。首先,对于一些持续时间比较长的瞬时性故障,等待了系统设定的去游离时间后可能故障仍未消失,或者绝缘还未完全恢复,此时进行重启,必然会重启失败,导致直流系统在瞬时性故障下闭锁,造成不必要的停运。2013 年,楚穗直流和天广直流都发生了线路遭受雷击后因故障重启失败导致直流闭锁的事件^[9]。其中,楚穗直流因去游离过程结束后电弧未熄灭,故障未消除,直流电压建立失败导致闭锁;天广直流因去游离过程结束后,绝缘强度未恢复,连续 3 次重启失败导致闭锁。

其次,对于永久性故障也会按设定的最大重启动次数重复故障重启动过程,等到最后一次重启失败判定为永久性故障后才会发出闭锁信号,启动安全稳定控制。这种情况下,每一次重启对整个系统而言都是一次大的冲击;这也大大延长了稳控装置动作的时间,降低了系统的稳定极限,需要多切机组、切负荷才能维持系统稳定。其结果比故障后直接闭锁不再重启动更严重,在双极故障且重启动失败的极端情况下,对系统的不利影响更大,系统失稳的风险也更大^[8,16,18]。

2 VSC-HVDC 直流线路故障清除及恢复策略

目前工程中采用的 VSC-HVDC 系统典型结构见图 3 和图 4,其中 VSC 表示电压源型换流器。

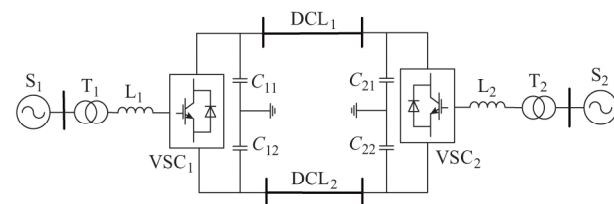


图3 单极接线两电平柔性直流输电系统
Fig.3 Monopolar VSC-HVDC system
based on two-level converters

开关器件两端并联有反向续流二极管,两电平结构换流器直流线路出口处并联有大电容,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的每个半桥型子模块(half bridge submodule, HBSM)中也并有电容。不管采用哪种换流器,当直流线路发生故障时,电容都会向故障点放

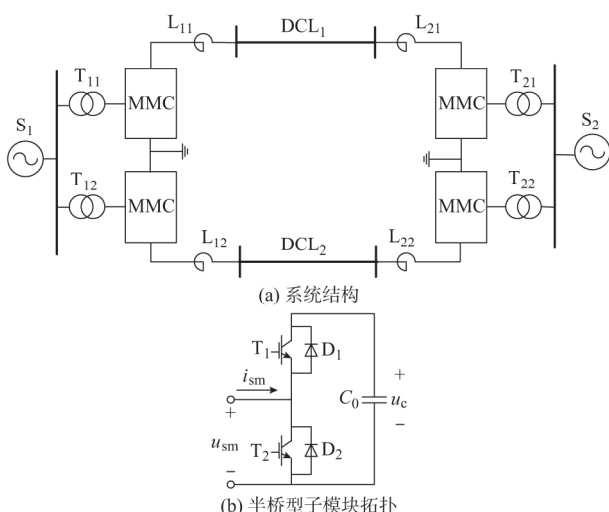


图4 双极接线模块化多电平柔性直流输电系统
Fig.4 Bipolar VSC-HVDC system based on MMCs

电,造成直流电流急剧上升;而且即使闭锁换流器,交流系统和故障点仍可通过续流二极管构成回路,整个系统处于不控整流状态,无法像 LCC-HVDC 系统一样通过控制系统隔离和清除故障^[19-20]。因此,柔性直流输电系统中直流线路故障问题更严峻。

目前采取闭锁换流器和跳开交流断路器的方法来清除故障电流,电流衰减到零后,再重合交流断路器,重新启动^[21]。这种方法虽然简单、易于实现,但是交流断路器动作时间长,仍会造成系统长时间过流,危害二极管等设备安全;而且线路恢复所需的时间也较长,将导致系统长时间停运,降低了其可用率和供电可靠性,成为限制柔性直流输电技术发展的主要因素之一^[11,21-23]。为了解决这一问题,实现故障的快速清除和恢复,国内外主要展开了关于直流断路器、具有故障自清除能力的子模块、增加辅助电路 3 个方向的研究。

2.1 直流断路器技术

类似于用交流断路器处理交流线路故障,可以用直流断路器处理直流线路故障,但是直流断路器的要求比交流断路器高,技术实现也更难。主要原因有:①柔性直流输电系统阻尼远小于交流系统^[24],直流线路发生故障后,直流电流会快速上升,而且能达到很大的峰值,所以为了保护电力电子设备不受大电流的冲击,也为了降低对断路器开断电流水平的要求,断路器必须在故障后几毫秒内快速动作,这对直流断路器的速动性提出了极高的要求。②直流输电具有高电压、大电流的发展趋势,即使断路器能快速动作,需要开断的故障电流水平也相对较高;③直流故障电流没有自然过零点,无法直接使用交流断路器的开断方法;④还需考虑直接开断电

流可能引发的暂态分断过电压问题,直流系统感性元件储存的能量及交流系统注入能量的吸收问题,直流断路器工程应用的经济性、可靠性等问题^[25-27]。

根据电流开断原理的不同,直流断路器可分为机械式直流断路器、全固态直流断路器和混合式直流断路器 3 类,基本结构如图 5 所示,其中 M 端接换流器, N 端接直流线路。

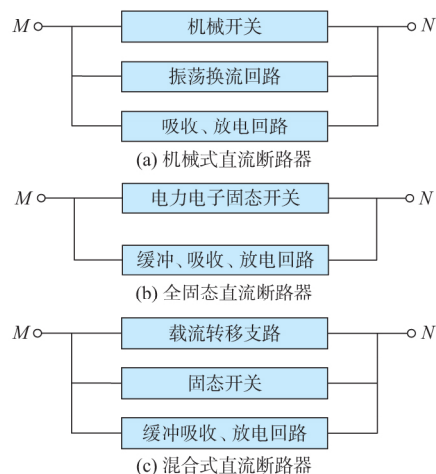


图5 3类直流断路器基本结构
Fig.5 Basic structure of three types of DC breakers

机械式直流断路器主要由机械开关、振荡换流回路、能量吸收与放电回路等部分组成。采用只具有电流过零开断能力的传统交流机械开断单元,必须通过构造人工电流过零点或将直流电流限制到足够小才能开断电流。机械式直流断路器正常运行时损耗小,结构简单,成本低,但其分断能力有限,而直流故障电流上升快、峰值大,等待电流到达过零点再开断需要很长时间,不能满足速动性的要求^[24]。

全固态直流断路器主要由电力电子固态开关和吸能支路组成,固态开关利用晶闸管、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等电力电子器件关断故障电流,吸能支路用于吸收感性元件存储的磁场能量。固态直流断路器分断速度快、不产生电弧,但正常运行时电流流过固态开关支路,产生的通态损耗高;且单个开关电压电流等级较低,在高压大容量直流输电系统中需要大量器件进行串并联,因此造价昂贵,还需要均压和同步控制,限制了其在高压直流输电系统中的应用^[26]。

混合式直流断路器主要由载流转移支路、固态开关支路、吸能支路组成。系统正常运行时,负荷电流流经载流转移支路;发生故障后,故障电流转移至固态开关支路,由固态开关和吸能支路完成故障电流的开断和能量的吸收。混合式直流断路器综合了机械式断路器和全固态断路器的优点,通态损耗小、

开断时间短,以显著的技术和性能优势成为高压直流断路器研制的主流,具有很大的发展潜力^[21,25]。2016年12月29日,采用全桥模块级联的混合直流断路器(额定电压200 kV,分断时间3 ms,最大分断电流15 kA)在舟山五端柔性直流输电工程中完成168 h试运行,成功实现舟定站的带电单站投退和直流侧故障快速隔离,大大提高了柔性直流输电系统的供电可靠性和灵活性^[21]。张北±500 kV柔性直流电网示范工程也将使用混合式直流断路器(额定电压500 kV,分断时间3 ms,最大分断电流25 kA)来处理直流线路故障^[21]。

直流断路器可以直接切断故障电流,只断开故障线路,动作速度快,在IGBT等电力电子器件承受能力允许的情况下,无需闭锁换流器,能保证非故障线路正常运行,从根本上解决柔性直流系统直流故障清除和隔离的问题^[18],提高系统的可用率,特别是对于多端直流系统、直流电网的构建具有明显的优势^[28],随着技术的进步,将会得到更快的发展和更广泛的应用。但是直流断路器会在等待设定的去游离时间后自动重合以快速恢复运行,这个过程中也存在盲目恢复的问题。

2.2 具有故障自清除能力的子模块

具有故障自清除能力的子模块在故障后能将子模块电容电压反极性投入到故障电流通路中,无论故障电流方向如何,均能产生和故障电流方向相反的电容放电电流,使故障电流快速衰减,并且吸收故障回路的能量,实现故障的快速清除^[3]。

文献^[29-30]介绍了2种典型的具有故障自清除能力的子模块拓扑:全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)和钳位双子模块(clamp double sub-module, CDSM),分别如图6(a)和(b)所示。FBSM在半桥子模块的基础上并联了由2个IGBT组成的支路,正常运行时要求其中2个开关器件同时导通,输出电压与半桥型子模块相同,但是控制策略不同;CDSM利用1个IGBT支路和2个二极管将2个半桥子模块并联在一起,正常运行时相当于2个半桥子模块串联,输出电压为半桥子模块的2倍,可以借鉴半桥型子模块的控制方法。当换流器闭锁后,所有IGBT都处于关断状态,由于二极管的单向导通性,不管电流方向如何,模块电容始终反极性串联在故障回路中,其放电电流与故障电流方向相反,故障电流快速衰减到零。同样由于二极管的存在,故障电流下降到零后不会再反向增大^[3,31],故障电流被完全清除。

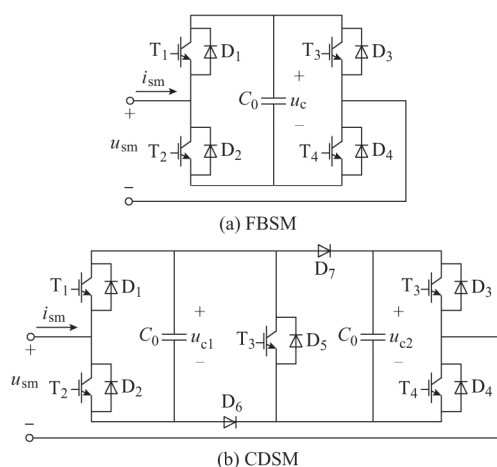


图6 典型具有故障自清除能力的子模块拓扑

Fig.6 Topology of typical sub-modules with fault self-clearing capability

在此基础上,串联双子模块、交叉连接型子模块、混合型子模块、二极管钳位型子模块、增强自阻型子模块等新型子模块拓扑相继被提出^[32]。但是具有故障自清除能力的子模块必须在半桥型子模块的基础上增加一定数量的开关器件和二极管,普遍存在成本高、损耗大、控制复杂等特点,文献^[32-33]对不同拓扑的成本、损耗及故障清除时间、交流源阻断能力、控制复杂程度、谐波含量等关键性能进行了对比分析。近年来,基于不同子模块混合级联的换流器拓扑成为了研究的一大趋势^[34-35],其基本思路是结合不同子模块优势,在降低成本和损耗的同时,具备较好控制性能和故障清除能力。

在清除故障电流时,需要将系统内所有的换流器均闭锁,会造成系统短时停运,扩大了故障影响范围,不利于多端直流系统及直流电网的构建和系统的安全、可靠运行。而且由于换流器成本极高,不可能更换已经投入运行的直流输电工程的换流器,所以不能解决已投运工程面临的直流线路故障问题,目前尚未得到工程应用。

待一定的去游离时间后,解锁换流器,对于大多数瞬时性故障,系统可以恢复正常运行。但是对于永久性故障,在解锁失败后才重新闭锁、停运,造成对系统的二次冲击;对于复杂瞬时性故障,也会解锁失败造成系统不必要的停运。对于配置直流隔离开关的线路,会将故障线路两端的隔离开关分断,隔离故障线路后再将换流器解锁,使健全线路恢复运行^[25],直接造成瞬时性故障下的停运。出现这些问题都是由于无法在换流器解锁前对故障状态进行判断,盲目恢复造成的。

2.3 增加辅助电路

除了改变换流器拓扑,另一种思路是在已有的

半桥型子模块换流器的基础上,在其直流侧或者交流侧增加一些辅助电路,起到故障后隔离交流系统、加速故障电流衰减、隔离故障线路的目的,使故障得以清除。

文献[36]提出了图7(a)所示结构,在子模块两端加入反并联晶闸管,直流线路故障后立即闭锁换流器,同时触发所有反并联晶闸管导通,将直流故障回路与交流回路隔开,直流故障回路中没有了外加电源,故障电流能衰减至零;然后移除晶闸管导通信号,当交流电流过零时,晶闸管可自然关断;直流故障电流和交流电流均已清除后再解锁换流器。文献[37]将反并联晶闸管支路加在换流变压器与换流器之间,进一步将故障后的交流回路和直流回路彻底隔离,如图7(b)所示。2种方案均可以实现直流故障的清除,但是会将直流故障转化为交流故障,增加故障后的交流电流水平,而直流故障电流衰减较慢,故障清除时间和系统恢复时间都比较长;同时因为增加了晶闸管,控制系统也更复杂。

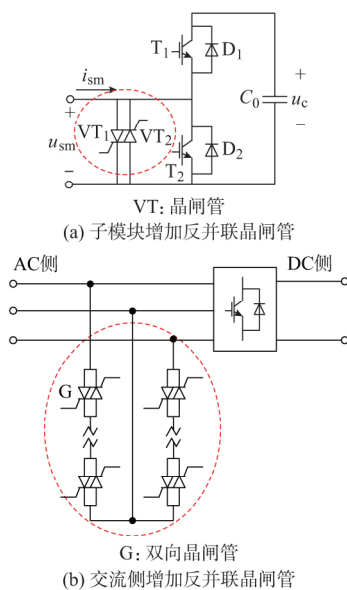


图7 辅助隔离电路

Fig.7 Auxiliary isolating circuits

为了限制交流电流和加快直流电流的衰减,文献[38]提出在交流侧串联图8(a)所示限流器;文献[39]提出在换流桥臂中串联图8(b)所示阻尼模块,但是阻尼模块由IGBT控制工作状态,会增加正常运行时的损耗,通过阻尼电阻限制电流,还需要考虑由此产生的电阻的热效应问题;文献[40]提出了一种固态直流限流器,正常运行时通过机械开关导通,降低了通态损耗。为了隔离故障线路,文献[41]还在直流线路出口处加入了直流隔离开关,当直流故障电流衰减到较小值时,可以断开隔离开关,隔离故

障线路后解锁换流器,使健全线路恢复运行。

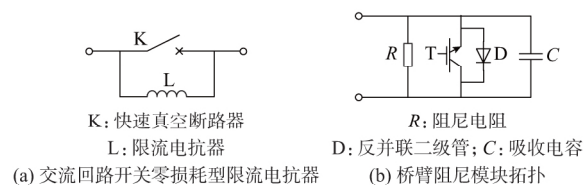


图8 故障限流电路

Fig.8 Fault current limiting circuits

由此可见,通过增加辅助电路的方法也能处理直流线路故障,但是采用单一的辅助电路并不能彻底解决问题,而是需要多种辅助电路的组合。在该方法中也需要闭锁换流器,不适合用于多端直流系统和直流电网,所以还需要对辅助电路的性能、增加的成本、损耗等做进一步的考量。

3 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 输电线路故障清除及恢复所面临的共性问题及解决方案探讨

3.1 直流线路故障清除及恢复存在的问题

综合前两节的分析,LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 直流线路故障清除及恢复策略存在共性问题:在故障处理过程中缺少对故障状态进行判别的环节,系统恢复具有盲目性。在故障电流清除,等待一定的去游离时间后,LCC-HVDC 系统会进行重启,VSC-HVDC 系统会进行直流断路器自动重合或者换流器解锁。采取这些措施的本来目的是使线路在瞬时性故障下快速恢复运行,提高供电可靠性。但是若线路上发生的是永久性故障,会因多次重启造成对整个系统的多次冲击;若发生的是复杂瞬时性故障,会因等待的去游离时间不足导致恢复失败,造成不必要的停运。

3.2 HVDC 输电线路故障清除及恢复问题解决方案探讨

在交流系统中,断路器自动重合闸也存在同样的问题。文献[42]最早提出了交流系统单相接地瞬时性故障和永久性故障的判别方法,有了自适应重合闸的概念,后续又有许多针对交流系统不同线路结构、应用场合中自适应重合闸的研究^[43-44]。所提出的方法通常通过分析故障电弧特性、恢复电压特性来识别永久性故障和瞬时性故障,仅在瞬时性故障下才允许重合断路器;甚至能进一步判断故障熄灭时刻,优化重合闸时间。部分方法已经得到实际的应用^[45],并且取得了很好的效果,有效提高了重合闸成功率。

借鉴交流断路器自适应重合闸的思路,也可以

对直流线路故障自适应恢复展开研究,形成更完善的直流线路故障处理方案。一方面,识别瞬时性故障和永久性故障,在永久性故障下直接闭锁,避免对系统的二次冲击,为安全稳定控制系统争取时间;另一方面,优化线路恢复时间,提高瞬时性故障下的恢复成功率。

虽然在交流断路器自适应重合闸方面已经进行了很多研究,但由于交直流线路故障清除原理、故障电弧、耦合特性的区别,换流器控制环节影响等原因,现有的方法并不能直接应用,需要进一步对不同直流系统展开针对性的研究。由于故障电弧具有非线性特性和不确定性,故障状态与故障电弧之间的对应关系也可能存在差异^[38],所以重点根据恢复电压阶段特性,利用直流线路耦合关系及直流系统的可控性来实现自适应恢复,具体研究思路如下:

1)对于采用 DFRS 的 LCC-HVDC 系统,故障线路与换流器仍保持电气连接,各电气量的特性与换流器有关。文献[9]将故障点消失后的线路结构与逆变站带线路开路实验的系统结构相联系,分析得到故障点消失后恢复电压值与故障电阻、故障距离、线路对地电导有关,并且提出了利用电压幅值判断故障状态的方法。由于并没有得出恢复电压明确的表达式,其阈值的确定依赖于仿真数据,而且文中阈值的选取方法可以保证永久性故障时系统不重启,但是某些瞬时性故障也会被判断为永久性故障,导致换流器闭锁。

2)对于采用直流断路器的 VSC-HVDC 系统,断路器动作后,故障线路两端与系统断开,其特性主要由故障点、健全线路的耦合效应决定。

3)对于采用具有故障自清除能力子模块的 VSC-HVDC 系统,其电气特性同样与换流器有关。文献[46]针对采用 FBSM 的换流器,利用换流器不控整流时电流在 2 种故障状态下的区别来判断故障状态,并且验证了该方法对混合式拓扑的适用性。这为在该类系统中实现故障性质判断提供了思路,可以利用 MMC 快速、灵活的控制特性来辅助进行判断。

4)近年来,混合直流输电技术也引起了人们的关注^[47]。混合直流输电结合了 LCC-HVDC 输电技术和 VSC-HVDC 输电技术的优点,解决了前者逆变器易发生换相失败的问题,但同时无法仅利用控制特性来清除直流线路故障,如何进行直流线路故障的清除也是需要研究的问题。就目前的研究现状而言,柔性直流端可以直接采用具有故障自清除能力的子模块,也可以采用半桥型子模块和直流断路

器的方法。还需要对 2 种方法的故障处理能力和经济性进行进一步的对比分析,并结合前面的三点研究进行自适应恢复的研究。

综上所述,直流输电线路故障自适应恢复包括 LCC-HVDC 直流线路自适应重启、直流断路器自适应重合闸、MMC 自适应解锁 3 个方面的基本内容以及混合直流输电系统故障清除方法及自适应恢复研究。在已有的研究基础上,还需要进一步分析不同直流输电系统线路不同故障状态下的暂态过程,尤其是故障消失后电压、电流等电气量的特征,并结合线路耦合特性、系统控制特性推导能用于故障状态判别的数学表达式,作为构造线路自适应恢复判据、算法的依据。此外,在研究具体算法时,如果 2 种故障状态的区分边界不明显,在边界条件下就可能会出现误判,导致系统在永久性故障下重启或者瞬时性故障下闭锁^[48],所以为了实现准确、可靠判别,还应该寻找能明显区分 2 种故障状态的方法。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 张勇军. 高压直流输电原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
ZHANG Yongjun. Principle and application of HVDC transmission [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
XU Zheng. Flexible DC transmission system [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [4] 罗澍忻. 高压直流输电线路继电保护研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
LUO Shuxin. Research on relay protection of HVDC transmission lines [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [5] 郑超, 马世英, 申旭辉, 等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2491-2498.
ZHENG Chao, MA Shiying, SHEN Xuhui, et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2491-2498.
- [6] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [7] 赵军, 曹森, 刘涛, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启策略研究及优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 126-132.
ZHAO Jun, CAO Sen, LIU Tao, et al. Research and optimization on DC line fault recovery strategy used in Gui-

- Guang HVDC project [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 126-132.
- [8] 任祖怡, 左洪波, 吴小辰, 等. 用于安全稳定控制的高压直流极闭锁判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 41-44.
- REN Zuyi, ZUO Hongbo, WU Xiaochen, et al. HVDC pole blocking detection for security and stability control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 41-44.
- [9] 张烁. 高压直流输电系统线路保护、故障重启及故障测距方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- ZHANG Shuo. Research on HVDC line protection, DC line fault recovery and fault location [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [10] 邬乾晋, 周全, 黄义隆, 等. 高压直流典型线路雷击故障的控制保护响应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 140-145.
- WU Qianjin, ZHOU Quan, HUANG Yilong, et al. Research of HVDC control and protection response for lightning stroke failures occurred in transmission lines [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 140-145.
- [11] 刘剑, 邹能灵, 范春菊, 等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 158-167.
- LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-167.
- [12] 贺家李. 电力系统继电保护原理[M]. 4版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- HE Jiali. Principle of power system relay protection [M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [13] 邓本飞. 天广高压直流输电线路保护系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 71-74.
- DENG Benfei. HVDC line protection summary of Tian-Guang project [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 71-74.
- [14] 王海军, 吕鹏飞, 曾南超, 等. 贵广直流输电工程直流线路故障重启功能研究[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 32-35.
- WANG Haijun, LÜ Pengfei, ZENG Nanchao, et al. Research on DC line fault recovery sequence of Guizhou-Guangdong HVDC project [J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 32-35.
- [15] 刘明松, 张文朝, 吴虎, 等. 弱受端系统直流再启动方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 130-135.
- LIU Mingsong, ZHANG Wenchao, GUO Hu, et al. DC line fault recovery schemes of weak receiving systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 130-135.
- [16] 周红阳, 刘映尚, 余江, 等. 直流输电系统再启动功能改进措施[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 104-107.
- ZHOU Hongyang, LIU Yingshang, YU Jiang, et al. Analysis and improvement of force retard function of HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 104-107.
- [17] 魏星. 云广±800 kV 直流输电线路重启功能分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3059-3064.
- WEI Xing. Analysis on DC line recovery sequence of Yunnan-Guangdong UHVDC project [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3059-3064.
- [18] 涂亮, 柳勇军, 付超, 等. 牛从直流线路故障再启动对系统稳定的影响及控制策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 50-55.
- TU Liang, LIU Yongjun, FU Chao, et al. Influence of DC line fault recovery on power system stability and control strategy in Niuzhai-Conghua project [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 50-55.
- [19] YANG J, ZHENG J, TANG G, et al. Characteristics and recovery performance of VSC-HVDC DC transmission line fault [C]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 28-31, 2010, Chengdu, China: 4p.
- [20] CHEN X, ZHAO C, CAO C. Research on the fault characteristics of HVDC based on modular multilevel converter [C]// IEEE Electrical Power and Energy Conference, October 3-5, 2011, Winnipeg, Canada: 91-96.
- [21] 魏晓光, 杨兵建, 汤广福. 高压直流断路器技术发展与实践[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3180-3188.
- WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, TANG Guangfu. Technical development and engineering applications of HVDC circuit breaker [J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3180-3188.
- [22] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [23] HAN X, SIMA W, YANG M, et al. Transient characteristics under ground and short-circuit faults in a ± 500 kV MMC-based HVDC system with hybrid DC circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1378-1387.
- [24] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.
- LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [25] 刘路辉, 叶志浩, 付立军, 等. 快速直流断路器研究现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 966-978.
- LIU Luhui, YE Zhihao, FU Lijun, et al. Research & development status and prospects of fast DC circuit breakers [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 966-978.
- [26] 何俊佳, 袁召, 赵文婷, 等. 直流断路器技术发展综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
- HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.
- [27] 徐政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 347-357.
- XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers [J].

- High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 347-357.
- [28] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, et al. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids [C]// International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, March 20-23, 2012, Chemnitz, Germany; 5p.
- [29] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications [C]// International Power Electronics Conference, June 21-24, 2010, Sapporo, Japan; 502-507.
- [30] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]// 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia, May 30-June 3, 2011, Jeju, South Korea; 1425-1431.
- [31] 薛英林,徐政.C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.
XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [32] 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.
WU Jing, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2681-2694.
- [33] 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.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei. Research on the key properties of MMC sub-modules with DC fault eliminating capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2114-2122.
- [34] TRAINER D R, DAVIDSON C C, OATES C D M, et al. A new hybrid voltage-sourced converter for HVDC power transmission [C]// CIGRE Session, August 22-27, 2010, Paris, France; 12p.
- [35] 李仲青,何佳伟,李永丽,等.具有交流源完全阻断能力的混合式 MMC 拓扑[J].电力自动化设备,2018,38(3):96-101.
LI Zhongqing, HE Jiawei, LI Yongli, et al. Hybrid MMC topology with complete AC-side source blocking capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 96-101.
- [36] LI X, SONG Q, LIU W, et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [37] ELSEROUGI A A, ABDEL-KHALIK A S, MASSOUD A M. A new protection scheme for HVDC converters against DC-side faults with current suppression capability [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1569-1577.
- [38] 郭敬梅,曾德辉,王钢,等.基于辅助电路的 MMC-HVDC 直流故障处理策略[J].电力系统自动化,2016,40(16):90-97.
GUO Jingmei, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Auxiliary equipment based processing strategy for MMC-HVDC DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 90-97.
- [39] 马焕,姚为正,吴金龙,等.含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J].电网技术,2017,41(7):2099-2106.
MA Huan, YAO Weizheng, WU Jinlong, et al. Analysis of DC pole-to-pole short circuit fault behavior in MMC-HVDC transmission systems with bridge arm damper [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2099-2106.
- [40] 官二勇,董新洲,冯腾.一种固态直流限流器拓扑结构[J].中国电机工程学报,2017,37(4):978-986.
GUAN Eryong, DONG Xinzhou, FENG Teng. A solid DC current limiter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 978-986.
- [41] 阙波,李继红,汪楠楠,等.基于桥臂阻尼的柔性直流故障快速恢复方案[J].电力系统自动化,2016,40(24):85-91.
QUE Bo, LI Jihong, WANG Nannan, et al. Arm damping based quick recovery scheme for flexible HVDC fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 85-91.
- [42] GE Y Z, SUI F H, XIAO Y. Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [43] 宋国兵,索南加乐,孙丹丹.输电线路永久性故障判别方法综述 [J].电网技术,2006,30(18):75-80.
SONG Guobing, SUONAN Jiale, SUN Dandan. A survey on methods to distinguish permanent faults from instantaneous faults in transmission lines [J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 75-80.
- [44] 梁振锋,索南加乐,宋国兵,等.输电线路自适应重合闸研究综述 [J].电力系统保护与控制,2013,41(6):140-147.
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [45] 沈军,舒治淮,陈军,等.自适应重合闸在电力系统中的应用实践 [J].电力系统自动化,2018,42(6):152-156. DOI: 10.7500/AEPS20170323004.
SHEN Jun, SHU Zhihuai, CHEN Jun, et al. Application of adaptive auto-reclosure in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 152-156. DOI: 10.7500/AEPS20170323004.
- [46] 李斌,何佳伟,李晔,等.柔性直流输电系统新型故障重启方法 [J].电力系统自动化,2017,41(12):77-85. DOI: 10.7500/AEPS20170328003.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Novel restart scheme of DC fault for flexible DC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 77-85. DOI: 10.7500/AEPS20170328003.
- [47] 王永平,赵文强,杨建明,等.混合直流输电技术及相关分析 [J].电力系统自动化,2017,41(7):156-167. DOI: 10.7500/AEPS20161117005.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167. DOI: 10.7500/AEPS20161117005.
- [48] 葛耀中,索南,孔繁鹏,等.微机型自适应单相重合闸的判据和算法 [J].电力系统保护与控制,1995,23(2):7-9.

GE Yaozhong, SUO Nan, KONG Fanpeng, et al. criterion and algorithm of microcomputer adaptive single-phase reclosing[J]. Power System Protection and Control, 1995, 23(2): 7-9.

@163.com

董新洲(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:
电力系统继电保护。E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

蔡 静(1995—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:直流输电线路故障分析及保护。E-mail: caijing1257

Overview on Research of Fault Clearing and Recovery Strategy for HVDC Transmission Lines

CAI Jing^{1,2}, DONG Xinzhou^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The fast fault clearing and recovery of high voltage direct current (HVDC) transmission line are very important for the stable and reliable operation of the entire power system. This paper analyzes and summarizes the existing clearing and recovery strategies of DC line faults in both line commutated converter based HVDC (LCC-HVDC) system and voltage sourced converter based HVDC (VSC-HVDC) system. It is pointed out that the blind recovery in existing strategies will make greater impact on the entire system or unnecessary outage. A possible solution is proposed that the adaptive recovery of DC line faults in different HVDC transmission systems should be studied to achieve the safe and rapid recovery of HVDC transmission system and improve the comprehensive processing method of DC line faults.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900600, No. 2016YFB0900604).

Key words: high voltage direct current (HVDC) transmission; fault clearing of DC line; fault recovery of DC line; adaptive recovery; adaptive restart; adaptive reclosing; adaptive deblocking

(上接第 157 页 continued from page 157)

应用。E-mail: xgyin@hust.edu.cn

王 祯(1994—),女,博士研究生,主要研究方向:电力电子在电力系统中的应用。E-mail: wangzhen2016@hust.edu.cn

陈 玉(1990—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力电子在电力系统中的应用、电力系统继电保护。
E-mail: ChenYu_Huster@hust.edu.cn

尹项根(1954—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护与控制、电力电子在电力系统中的应用。

(编辑 蔡静雯)

Integrated Hybrid Compensation System for Distribution Transformer

WANG Zhen, YIN Xianggen, CHEN Yu, LAI Jinmu, LI Langzi, QI Zhenyu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: As an intersection of high and low-voltage levels in the distribution network, the distribution transformer is the key point of power quality control. This paper proposes an integrated hybrid compensation system for the distribution transformer with Dyn connection which is widely used in distribution networks. The active power filter (APF), the thyristor controlled reactor (TCR) and the passive filter branch access to the delta winding via connecting taps. TCR is used to dynamically achieve reactive power compensation and the passive filter branch is designed to be capacitive. The compensation range of TCR is extended. While partial harmonic current generated by the load and TCR can be filtered out. Then, the capacity of APF can be further reduced. APF is used to increase the dynamic response speed of reactive power compensation and compensate the harmonic current generated by load and TCR. The simulation results verify the effectiveness of the proposed scheme.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902900), National Natural Science Foundation of China (No. 51877089) and Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2018CFB580).

Key words: reactive power compensation; harmonic suppression; distribution transformer; active power filter (APF); thyristor controlled reactor (TCR); passive filter branch