

抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制

李兆伟^{1,2}, 吴雪莲^{1,2}, 曹 路³, 侯玉强^{1,2}, 李 威^{1,2}, 罗剑波^{1,2}, 刘福锁^{1,2}, 方勇杰¹

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏省南京市 211106;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106; 3. 国家电网公司华东分部, 上海市 200120)

摘要: 多直流馈入受端电网的换相失败是威胁系统安全的重要问题, 为增强系统的动态无功支撑能力, 降低直流换相失败概率, 国家电网有限公司将在全网部分直流换流站内配置一定数量的调相机。文中首先分析了调相机投运对电网直流换相失败特性的影响, 针对常规调相机控制方式在抑制直流连续换相失败方面的不足, 分析了调相机紧急控制对抑制直流连续换相失败的效果。根据实际电网中直流连续换相失败特点及控制要求, 设计了预防直流连续换相失败的调相机紧急控制系统架构, 并提出了调相机紧急控制的实现方法, 基于实际电网仿真验证了所提控制架构和方法的有效性。

关键词: 多直流馈入电网; 直流连续换相失败; 调相机; 紧急控制

0 引言

远距离、大容量特高压直流输电技术的快速发展对中国大范围优化配置资源发挥了重要作用。截至 2017 年底, 国家电网范围内在运特高压直流将达到 10 回, 直流额定输送总容量达到 83.6 GW, 与此同时, 电网一体化特征不断凸显, 直流送受端、交直流之间耦合日趋紧密, 特高压电网过渡期“强直弱交”特性更加明显^[1]。

直流输电中, “换相”是直流转换为交流的关键环节, 直流控制系统异常或交流侧电压异常都可能造成换相不成功, 称为“换相失败”^[2]。一般来说, 交流侧电压异常引发换相失败的可能性更大, 若异常因素在换相失败后消失, 直流系统即可恢复正常运行, 若异常因素持续存在, 则可能发生连续换相失败。直流一次换相失败一般持续几个毫秒, 但因换相失败引起的特高压直流功率波动过程可能长达 160~200 ms。如不做特殊说明, 本文所提“换相失败”均指“因换相失败引起的功率波动过程”。近年华东电网已发生多起因交流线路故障导致的多直流同时或连续换相失败^[3-4], 威胁电网的安全稳定运行。为了充分重视直流换相失败对电网的影响, 国

家电网有限公司(简称国网公司)积极推动修订了 Q/GDW 1404—2015《国家电网安全稳定计算技术规范》(以下简称《计算规范》), 将直流同时、连续换相失败纳入电力系统安全稳定防御标准故障^[5], 通过仿真计算提前掌握换相失败给电网运行带来的风险。

目前应对直流连续换相失败的措施主要有三大类。一是从换相失败的机理出发, 通过优化直流控制保护逻辑, 参数或在一、二次系统中增加附加控制来降低直流连续换相失败概率^[6-8], 但直流控制保护系统要兼顾直流运行控制各方面性能, 现有文献研究大多集中于对换相失败特性的改善, 而忽略了对其他方面的影响。二是基于直流连续换相失败导致电网失稳的机理, 在直流发生连续换相失败后, 通过采取紧急切机等措施^[9], 避免系统失稳。目前这种方法已应用于四川三大特高压直流(复奉、锦苏、宾金)换相失败紧急控制系统中。由于检测到多直流换相失败后即切除部分发电机组, 因此当直流换相失败恢复后系统中存在不平衡功率, 若系统规模不足可能诱发连锁故障问题。三是通过增加系统动态无功支撑能力^[10], 改善系统的动态电压稳定特性, 降低故障后系统电压的跌落幅度, 提高电压恢复速度, 进而降低直流连续换相失败概率。为此, 国网公司统筹规划系统动态无功布局, 在各分区电网部分直流换流站配置适量的调相机, 实现“大直流输电、强无功支撑”, 提高交直流混联电网安全稳定性^[11]。已有的分析表明, 调相机投运后可以大幅降低直流换相失败概率, 尽管新型调相机的调节性能已大幅

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2017-12-20。

上网日期: 2018-06-06。

国家电网公司科技项目“基于多数据源的交直流混联大受端电网电压全过程防御及直流落点近区电压控制措施研究与系统开发”; 已申请国家发明专利: 201710643171.X。

提升,但主要采用追随机端电压变化而快速改变无功出力的控制方式,在系统电压瞬时跌落扰动下其强励能力可能得不到充分发挥,很多情况下对直流连续换相失败不能起到有效的预防作用,为此有必要进一步深入发掘调相机潜力,开展利用调相机紧急控制抑制直流连续换相失败的研究。

本文紧密结合国家电网发展规划,针对在建的特高压直流受端电网调相机工程,首先分析了常规调相机控制方式在抑制直流连续换相失败方面的效果及不足,根据实际电网中直流连续换相失败特点及控制要求,设计了预防连续换相失败的调相机紧急控制系统架构,提出了调相机紧急控制实现方法,通过实际电网仿真验证了所提控制架构和方法的有效性,可为抑制直流连续换相失败提供技术支撑。

1 调相机对直流换相失败特性的影响

1.1 新型调相机的运行特性

调相机是一种特殊运行状态下的同步发电机,保留了同步发电机良好的无功调节性能,可在设计范围内开展无功连续调节,既可发出容性无功,也可发出感性无功。

表 1 调相机与 SVC、STATCOM 的综合比较
Table1 Comparison of synchronous condenser, SVC and STATCOM

设备类型	无功特性	响应时间	调节速度	有功损耗/%	占地面积	使用寿命/a
调相机	受系统电压影响小,过载能力强,可进相运行	20 ms	1~2 s 达到过载峰值	1.5	约为同等容量 SVC 的 1/3	30
SVC	与电压平方成正比,受系统电压影响大	20~60 ms	40~100 ms 达到第一峰值	0.8	较大	10
STATCOM	近似与系统电压成正比,受系统电压影响较大	<10 ms	40~100 ms 达到第一峰值	1	约为同等容量 SVC 的 1/3	10

1.2 调相机对直流换相失败特性的改善

华东电网是中国直流馈入回数最多、容量最大的区域电网,目前在运直流 10 回,额定输送容量 57.76 GW,其中特高压直流 6 回,按照规划 2018 年底还将投运±1 100 kV 准东—皖南特高压直流。对于华东多直流馈入受端电网,一旦发生交流故障可能引起多回直流同时、连续换相失败,甚至闭锁,严重威胁电网的安全稳定运行^[13]。根据规划,华东电网将于 2018 年底在锦苏、复奉、龙政、宾金、灵绍、锡泰、雁淮和准东直流受端换流站共配置 18 台调相机,单台额定容量均为 300 Mvar。考虑不同的调相机配置条件,基于 2018 年夏季高峰负荷典型方式,华东电网部分交流线路三相永久 N-1 故障后导致换相失败的直流回数如表 2 所示,为便于与无调相机时对比效果差异,调相机初始无功出力均为零。

为了适应多直流馈入电网的运行需求,国网公司组织国网经研院、中国电科院、清华大学、哈电机厂、上海电气、东方电气、南瑞集团等科研院所、重点院校和设备厂家,从系统需求、参数优化、设备研制等方面开展了新型调相机研究,全面提升了新型调相机的性能。新型调相机在额定容量、瞬态特性、暂态特性、深度进相能力以及运行维护等方面都有了较大的提升和改善^[11-12]。目前中国新设计的调相机组单机容量达到 300 Mvar,进相运行能力可以达到 200 Mvar,次暂态电抗由 15% 以上降低到了 10% 左右,瞬时无功输出能力提升 50% 以上。转子具备 15 s 的 2.5 倍强励要求,同时为了达到强励速度要求,在强励开始的前 5 s 内,强励达到 3.5 倍,且采用全密闭空冷形式,运行维护方便。

与静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等基于电力电子技术的动态无功补偿装置相比,新型调相机在容量、暂态和瞬态无功支撑能力方面均有优势,同时作为一种旋转设备,还能为系统提供可观的短路容量和转动惯量,提升系统的稳定性能,综合优势明显,整体比较如表 1 所示。

表 2 三相永久 N-1 故障后换相失败的直流回数
Table 2 Number of commutation failure DC after the three-phase permanent N-1 failure

故障线路名称	换相失败直流回数		
	无调相机	仅江苏投入 10 台调相机	调相机全部投入共 18 台
淮南特—芜湖特	9	9	9
淮南特—盱眙特	9	9	9
盱眙特—泰州特	9	9	9
芜湖特—安吉特	9	9	9
安吉特—练塘特	9	9	9
安吉特—兰江特	9	9	9
兰江特—莲都特	9	9	9
莲都特—榕城特	8	8	8
三官—通厂	9	7	6
东洲—吕四	7	3	3
昭关—当涂	8	3	2
昭关—福渡	8	2	2
大唐—宁德	7	5	5
回浦—三门	8	6	6
回浦—牛山	8	6	6
榕城—晴川	8	6	6

由上述统计结果可见,当发生 1 000 kV 特高压交流线路三相永久 $N-1$ 故障时,调相机投运对于减小换相失败的直流回数基本没有效果;而当交流故障发生在距离直流换流站较远地区的线路时(如苏北、安徽、福建等地区),调相机对减小同时换相失败的直流条数有一定的效果。这是由于直流因换流站电压下降发生换相失败与调相机增加无功出力几乎同时发生,当故障发生地点与换流站电气距离较近时,直流换相失败无法避免,调相机的瞬态、暂态特性对预防该类故障引起的首次换相失败效果不明显,与常规认识相符。当然,这与仿真选取的系统运行方式及调相机运行条件密切相关,研究表明若调相机保持一定无功输出,即利用调相机的稳态特性提高换流站初始电压水平,其抑制多直流同时换相失败的效果更加明显^[12]。

在直流连续换相失败的特性方面也有类似的结论。调相机投运后,由于系统动态无功支撑能力的提高,引起直流连续多次换相失败的交流故障有所减少,附录 A 表 A1 给出了 2018 年华东电网典型方式下采用不同的调相机配置策略时,500 kV 及以上线路发生单相开关拒动故障后西南送华东三大特高压直流连续换相失败两次及以上的情况统计。从表中的统计数据可见,虽然连续换相失败特性有所改善,但引起直流连续换相失败的交流故障的绝对数量很多,华东电网直流连续换相失败特性仍然非常严峻。

2 调相机参与紧急控制的需求

2.1 调相机抑制直流连续换相失败的不足

由 1.2 节分析可知,电网中配置调相机可以有效增加直流换流站近区的动态无功储备,对预防多直流同时、连续换相失败能起到一定作用。但由于调相机采用追随机端电压变化而快速改变无功出力的控制方式,电网中大部分故障下电压并不会持续维持在低水平下,而是随着故障发生及消失上下波动,直流换流站和近区调相机的交流母线电压几乎同时跌落,调相机无法在瞬间增发出足够的无功支撑电压维持波动前水平,也无法持续维持强励水平,对预防直流后续发生换相失败效果不佳。以华东电网 2018 年汛期低谷方式为例,华东配置 18 台调相机,当发生榕城—晴川三相永久故障边开关单相拒动时,宾金、宜华直流分别连续 4 次、3 次换相失败,直流换流站的母线电压曲线和调相机无功响应曲线如图 1 所示,直流有功及换流站近区调相机励磁电流响应曲线如附录 A 图 A1 和图 A2 所示。

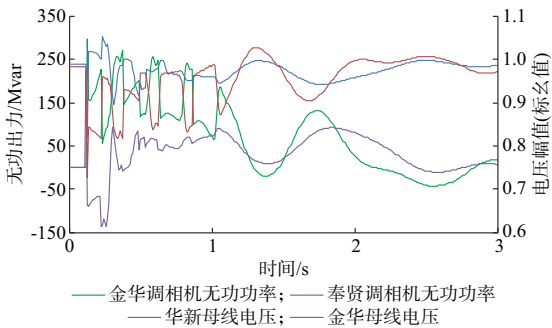


图 1 换流站母线电压与调相机无功功率曲线
Fig.1 Bus voltage curve of converter station and reactive power curve of the synchronous condenser

通过观察金华换流站(宾金直流近区)、奉贤换流站(宜华、林枫直流近区)内调相机无功及励磁电流响应可见,金华换流站由于靠近故障点,系统电压跌落较为严重,且随着系统振荡,电压也振荡明显,金华调相机励磁电流、输出无功也均随之振荡,不能维持在强励水平上,因此对直流后续换相过程未起到足够的支撑作用;而奉贤换流站由于远离故障点,交流母线电压没有明显的跌落,调相机的动态支撑作用也没有充分发挥出来,且随着直流换相失败期间直流滤波器无功过剩,甚至出现了短暂欠励,宜华直流由于电压的小幅降低仍然发生了换相失败。

2.2 调相机紧急控制对抑制连续换相失败的效果

在电网发生故障或直流发生换相失败后,利用电力系统紧急控制原理,通过故障信息紧急触发调相机励磁系统强励,并持续一段时间维持无功在高输出水平,可以充分发挥调相机的动态无功作用,有效增强系统电压抗扰动能力,降低直流后续发生连续换相失败的概率。基于 2.1 节的仿真条件,当发生榕城—晴川三永故障边开关单相拒动时,200 ms 后紧急强励金华、奉贤换流站内的调相机,宾金、宜华直流连续换相失败次数分别降至 2 次、1 次,其中宾金直流功率曲线和金华调相机的励磁电流曲线如附录 A 图 A3 所示。利用故障信息紧急控制调相机励磁系统强励,有助于充分发挥调相机动态支撑能力,有效降低直流连续换相失败概率。且强励倍数越高,响应速度越快,对抑制直流连续换相失败效果越好。

3 调相机参与电网紧急控制系统设计

3.1 调相机参与电网紧急控制的工程可行性分析

1) 触发信号的选择

预防直流连续换相失败的紧急控制系统首先要解决触发信号选取问题。根据仿真分析,引起直流

连续换相失败的故障类型和故障数量很多,如附录 A 表A1 所示,考虑配置调相机后仍有成百上千的各类故障会引起直流连续换相失败,调相机紧急控制若采用常规的交流系统故障触发,需要在上百个站点布置装置,且动作逻辑复杂,从工程的经济性和可靠性来讲,可行性较差。考虑到调相机紧急控制的目的是抑制直流连续换相失败,而通过分析发现首次换相失败往往伴随故障发生,难以避免,因此可以利用首次的直流换相失败信息作为触发信号,紧急控制调相机励磁系统进行强励。目前在中国西南电网三大特高压直流同时换相失败稳控系统中,利用直流换相失败信息作为切机措施的触发信号,已在实际工程中投入应用,工程效果良好。

2) 紧急控制时间要求

调相机紧急控制另外一个关键问题是紧急控制时间是否能够满足电网对连续换相失败的控制要求。根据《计算规范》,当“单回特高压直流相继发生 3 次因换相失败引起的功率波动过程”或“同送端、同受端三回及以上特高压直流相继发生 2 次因换相失败引起的功率波动过程”会导致系统安全稳定破坏时,可采取直流闭锁、切机、切负荷等措施。考虑到直流换相失败特点,一旦采取上述措施后若直流换相成功,直流送受端电网会存在大容量的不平衡功率,易引发系统连锁反应,威胁电网安全。因此,调相机紧急控制应将直流换相失败限制在 3 次甚至 2 次以内作为目标,以避免直流闭锁、切机和切负荷等措施的动作。由于实际运行中单次换相失败引起的功率波动过程持续时间一般为 160~200 ms,从检测到首次换相失败时刻计算,有 160~400 ms 的时间通过调相机的紧急强励抑制直流后续的换相失败,考虑到实际系统中同送端、同受端三回及以上特高压直流相继发生换相失败的情况较少,大部分情况下调相机紧急控制有 320~400 ms 的时间来发挥作用,对于中国成熟的稳控系统实施经验来说不难达到^[14]。

工程上影响调相机紧急控制时间的因素主要有两部分,一部分是稳控系统接收故障信息向调相机发送命令的时间,经过中国电网稳控系统长期实践,实际工程中基本可以控制在 100 ms 以内^[14]。另外一部分是调相机接收命令后快速提高无功出力的能力,新型调相机通过优化设计,暂态响应速度大幅提升,具备 0.65 s 内将无功出力从 300 Mvar 提升至 840 Mvar 的能力^[11],能够满足紧急控制时间的要求。

3.2 调相机参与紧急控制系统架构

根据抑制直流连续换相失败的控制需求,设计系统架构如图 2 所示。其基本思想是,紧急控制主站接收信息子站发送的直流换相失败信息,根据离线或在线生成的紧急控制策略,紧急强励相应的调相机,持续保持调相机无功出力在较高水平上。

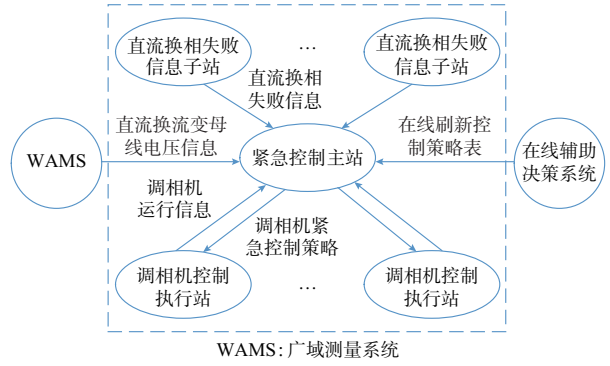


图 2 抑制直流连续换相失败紧急控制系统框图
Fig.2 Block diagram of the emergency control to suppress DC continuous commutation failure

紧急控制主站用于接收直流换相失败信息子站发送的直流换相失败信息,获取各直流换流站母线电压信息、各调相机运行信息,根据控制策略表向对应调相机控制执行站下发调相机强励倍数及持续时间指令。

直流换相失败信息子站用于接收直流控制保护系统发出的直流换相失败信息,并将该信息发送给紧急控制主站。

调相机控制执行站用于获取各调相机运行信息,并将该信息上送给紧急控制主站,接收紧急控制主站下发的强励倍数指令及持续时间指令,将该信息发送给调相机励磁控制系统,执行调相机紧急控制。

由于调相机强励之后,需要较长时间进行退热,为了保证设备安全,退热期间调相机不具备强励能力,因此应将调相机是否处于退热期纳入调相机运行监测。控制策略表可根据离线或在线时域仿真计算确定:离线时域仿真计算通常基于电网负荷高峰且所有直流满功率运行的典型方式开展,根据仿真结果制定固定的离线控制策略表,并在电网其他可能出现的运行方式下进行校核;在线时域仿真计算则根据电网实时运行方式,进行滚动计算,并根据仿真计算结果实时刷新形成在线控制策略表^[15]。当不具备在线计算功能或在线时域仿真计算功能不可用时,按照离线控制策略表执行控制策略。

3.3 调相机参与紧急控制的方法

抑制直流连续换相失败的调相机紧急控制流程

主要包括以下四个步骤。

1)在直流发生换相失败时,由直流换相失败信息子站从直流控制保护系统接收直流换相失败信息,并将其发送到紧急控制主站。

2)紧急控制主站接收上述换相失败信息后,获取发生换相失败的直流逆变站母线电压,获取电网内所有调相机运行信息。

3)紧急控制主站根据直流换相失败信息和直流逆变站母线电压信息,并综合调相机运行信息,从控制策略表匹配合适的紧急控制措施,发送给调相机控制执行站。

4)由调相机控制执行站向调相机励磁系统发送强励倍数及持续时间指令,持续时间结束或触发励磁系统过励保护限制后,调相机励磁系统进入退热期,完成调相机紧急控制。

电力系统的电压稳定性问题属于局部问题,一般避免无功大范围、远距离传输。因此,在考虑调相机紧急控制时,优先考虑利用发生换相失败的直流近区调相机进行强励,当无法解决问题时,可以考虑其他控制灵敏度较高的调相机进行辅助。需要指出,考虑调相机紧急控制后,可将直流连续换相失败的概率进一步大幅降低,但直流近区发生一些严重故障,仍无法完全抑制直流连续换相失败,对于类似严重情况必要时可采取直流闭锁、切机、切负荷等措施保证系统安全稳定运行。

当多回直流同时换相失败触发系统中多台调相机同时强励时,需要校核不同调相机强励对各直流换相是否产生负效应,同时多台调相机尽量避免同时退出强励,以减小系统瞬时的无功扰动,降低对系统的影响。

4 实际电网算例分析

以华东电网 2018 年汛期小负荷典型方式为例,华东全网负荷 155 GW,直流落地功率 35.3 GW,其中,三大特高压水电直流满送。

场景 1:苏北 500 kV 东洲—三官线东洲侧三永 N—1 故障,调相机基于常规控制方式时,锦苏直流连续三次换相失败,若在首次换相失败后将苏州调相机紧急强励至 2.5 倍励磁电流,同样的故障下,锦苏直流仅发生一次换相失败。采用调相机紧急控制下的直流功率和调相机无功出力如图 3 所示,调相机常规控制方式下直流功率和调相机无功响应如附录 A 图 A4 所示。

场景 2:江苏 500 kV 线路上党—龙王线单永故障,1.3 s 重合闸失败后三相断线,若调相机采取常

规控制,锦苏直流在两次接地故障中各发生一次换相失败,响应曲线如附录 A 图 A5 所示。若在锦苏直流第一次换相失败后,向苏州调相机发送紧急控制命令,紧急将调相机强励至 2.5 倍励磁电流,可以避免重合闸时的再次换相失败,采用调相机紧急控制下的直流功率和调相机无功出力如图 4 所示。

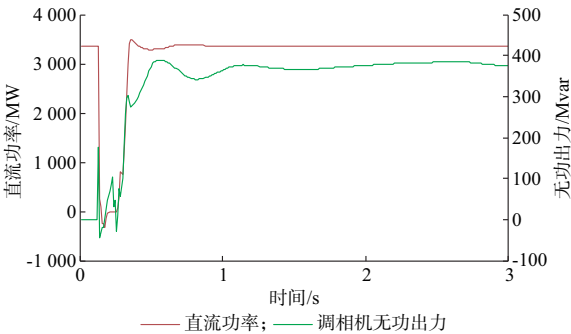


图 3 场景 1 调相机紧急控制下的功率曲线图
Fig.3 Power curves under emergency control of the synchronous condenser in case 1

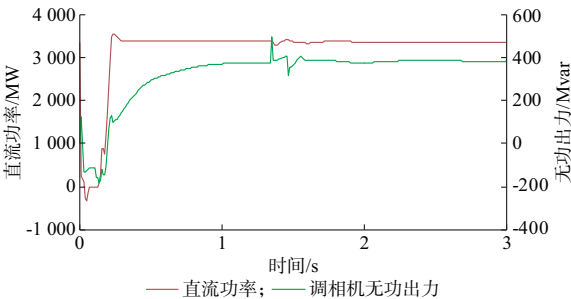


图 4 场景 2 调相机紧急控制下的功率曲线图
Fig.4 Power curves under emergency control of the synchronous condenser in case 2

可见,调相机采取紧急控制,在第一次换相失败后通过强励,持续增发无功,对于重合闸后再次接地导致的连续换相失败,也能起到一定预防作用,有助于提高交流线路单相重合闸时间整定的灵活性。

调相机紧急控制以直流换相失败信号作为触发信号,但由于系统运行方式多变,并不是每次直流换相失败后都伴随有后续连续换相失败,若所有直流同时仅发生一次换相失败,需要校核所有调相机强励后是否产生控制负效应,是否会引起调相机近区系统过电压等问题。以苏北 500 kV 线路滨响—潘荡线路三永 N—1 故障为例,该故障下华东全网 10 回直流同时发生一次换相失败,调相机紧急控制使全网所有调相机紧急强励至 3 倍励磁电流,部署有调相机的特高压直流换流站母线电压如附录 A 图 A6 所示,虽然电压有所升高,但是并未达到 1.05 倍标幺值,电压可维持在正常运行水平以内。考虑 2 s 后,所有调相机同时退出强励,换流站母线

电压略有下降,但在系统可承受范围内,也未激发新的直流发生换相失败。可见,对于华东电网而言,即使考虑最极端情况,所有直流仅换相失败一次,紧急强励所有调相机,调相机增发的无功不会引起过电压问题,调相机退出强励时电压跌落也较小,不足以对直流运行状态产生影响。

5 结论

多直流馈入电网内的多回直流连续换相失败威胁着系统的安全稳定运行,为了提高电网动态无功储备,预防或避免多回直流同时换相失败、闭锁情况发生,中国目前正在大量建设同步调相机。然而,大量的仿真分析表明,调相机投运后,虽然可大幅降低多直流换相失败概率,但是,仅依靠调相机的自发响应,调相机动态无功支撑能力得不到充分发挥,直流连续换相失败问题仍较为严重。因此本文对调相机参与电网紧急控制进行了探索研究,主要有以下结论。

1)直流首次换相失败往往伴随系统故障发生难以避免,本文提出利用直流换相失败信息触发调相机紧急控制,使调相机持续强励一段时间,可有效降低直流连续换相失败概率。相比采用常规的交流系统故障触发调相机紧急控制,可大幅减少紧急控制装置布点,提高紧急控制系统运行可靠性和经济性。同时,根据《计算规范》对直流连续换相失败的控制要求,调相机紧急控制时间能够满足电网控制需求。

2)利用调相机参与电网紧急控制,可有效降低直流连续换相失败概率,保障大电网安全稳定运行。但调相机紧急控制不能解决所有的直流连续换相失败问题,特别是在直流近区发生严重故障。对于不能解决的故障场景,需要深入分析直流连续换相失败对直流送受端电网的影响,必要时可采取直流闭锁、切机、切负荷等措施保障系统安全稳定运行。

3)研究发现,调相机强励能力越高,抑制直流连续换相失败效果越好。而调相机的强励能力是一个反时限问题,从仿真以及实际发生的直流换相失败过程来看,连续换相失败持续时间一般在 1~2 s 内,因此,从抑制连续换相失败的角度,有必要重点开发调相机短时、高倍数过载能力,尤其是 5 s 内的强励能力。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术,2016,40(4):985-991.

LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[2] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社, 2011.

ZHAO Wanjun. Engineering techniques of HVDC transmission [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.

[3] 王晶,梁志峰,江木,等.多馈入直流同时换相失败案例分析及仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 141-146. DOI: 10.7500/AEPS20140314007.

WANG Jing, LIANG Zhifeng, JIANG Mu, et al. Case analysis and simulation of commutation failure in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 141-146. DOI: 10.7500/AEPS20140314007.

[4] 李兆伟,翟海保,刘福锁,等.华东大受端电网直流入能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 147-152. DOI: 10.7500/AEPS20150420004.

LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability evaluation for East China power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 147-152. DOI: 10.7500/AEPS20150420004.

[5] 国家电网安全稳定计算技术规范: Q/GDW 1404—2015[S]. 2016.

Safety and stability calculation technical specification of State Grid: Q/GDW 1404—2015[S]. 2016.

[6] 李新年,陈树勇,庞广恒,等.华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140. DOI: 10.7500/AEPS20140305002.

LI Xinnian, CHEN shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140. DOI: 10.7500/AEPS20140305002.

[7] 郭春义,李春华,刘羽超,等.一种抑制传统直流输电连续换相失败的虚拟电阻电流限制控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4930-4937.

GUO Chunyi, LI Chunhua, LIU Yuchao, et al. A DC current limitation control method based on virtual-resistance to mitigate the continuous commutation failure for conventional HVDC[J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(18): 4930-4937.

[8] 陆翌,童凯,宁琳如,等.基于虚拟电感的双馈入直流输电系统连续换相失败的抑制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1503-1509.

LU Yi, TONG Kai, NING Linru, et al. A method mitigating continuous commutation failure for double-infeed HVDC system based on virtual inductor[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1503-1509.

[9] 苏寅生,陈董秀,鲍颜红,等.应对直流连续换相失败的紧急控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 126-131.

SU Yinsheng, CHEN Dongxiu, BAO Yanhong, et al. An emergency control strategy coping with continuous commutation

- failure in DC system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 126-131.
- [10] 张红丽,刘福锁,李威.动态无功补偿装置提高多馈入直流恢复的布点方法[J].电力系统自动化,2016,40(5):133-138.DOI: 10.7500/AEPS20150518001.
- ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei. Site selection for dynamic reactive power compensation and improvement of recovery from commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 133-138. DOI: 10.7500/AEPS20150518001.
- [11] 蒋维勇,戚庆茹.在“强直弱交”混联电网为什么要安装调相机?[N].国家电网报,2016-08-09(6).
- JIANG Weiyong, QI Qingru. Why is it necessary to install synchronous condenser in the “strong DC and weak AC” hybrid power grid?[N]. State Grid News, 2016-08-09(6).
- [12] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等.新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J].电网技术,2017,41(1):22-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [13] 李兆伟,吴雪莲,庄侃沁,等.“9·19”锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J].电力系统自动化,2017,41(7):149-155.DOI:10.7500/AEPS20160910002.
- LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of East China Grid after bipolar locking of “9·19” Jinping-Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155. DOI: 10.7500/AEPS20160910002.
- [14] 李德胜,罗剑波.特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J].电力系统自动化,2016,40(14):151-157.DOI:10.7500/AEPS20160120010.
- LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157. DOI: 10.7500/AEPS20160120010.
- [15] 方勇杰,鲍颜红,徐伟,等.电力系统安全稳定预防控制在线计算方法的评述[J].电力系统自动化,2015,39(11):199-207. DOI:10.7500/AEPS20140812003.
- FANG Yongjie, BAO Yanhong, XU Wei, et al. Review of on-line calculation methods of preventive control for power system security and stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 199-207. DOI: 10.7500/AEPS20140812003.

李兆伟(1985—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: lizhaowei@sgcpc.com.cn

吴雪莲(1989—),女,通信作者,硕士,助理工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: wuxuelian@sgcpc.com.cn

曹路(1971—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行分析。E-mail: cao_l@ec.sgcc.com.cn

(编辑 代长振)

Emergency Control of Synchronous Condenser to Suppress DC Continuous Commutation Failure

LI Zhaowei^{1,2}, WU Xuelian^{1,2}, CAO Lu³, HOU Yuqiang^{1,2}, LI Wei^{1,2}, LUO Jianbo^{1,2}, LIU Fusuo^{1,2}, FANG Yongjie¹

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

3. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: DC commutation failure of the multi-infeed DC system is an important issue that threatens the security of power grid. In order to enhance the dynamic reactive power support capability of the system and reduce the probability of DC commutation failure, the SGCC will allocate a certain number of synchronous condensers in some DC converter stations of the whole network. In this paper, the impact of the commissioning of the synchronous condensers on the DC commutation failure characteristics is analyzed. In view of the shortcomings of the conventional control mode of the synchronous condensers in suppressing the continuous commutation failure of the DC, the effect of the synchronous condensers in the emergency control on the DC continuous commutation failure is analyzed. According to the characteristics of the continuous commutation failure and the control requirements, the emergency control system architecture for preventing DC continuous commutation failure is designed, and the realization method of the emergency control of the synchronous condensers is put forward. The effectiveness of the proposed control architecture and method is verified based on the real grid simulation.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: multi-infeed DC system; DC continuous commutation failure; synchronous condenser; emergency control