

2018年多直流馈入江苏规划电网连锁换相失败分析

周前¹, 张潮², 张宁宇¹, 邵雨薇², 王思成², 韩松²

(1. 国家电网公司变电站智能设备检测技术重点实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:针对2018年多直流馈入江苏规划电网,基于电力系统仿真程序PSD-BPA,研究了受端交流系统故障导致直流连锁换相失败及闭锁的问题,总结了多馈入交互作用因子以及节点电压交互作用因子在实际电网中的应用规律。由于江苏电网多回直流之间存在一定的相互耦合作用,当交流系统中主要线路发生故障后,会引起多条直流的连锁换相失败。此外,由于耦合程度的大小,相比于直流换流母线处发生故障,直流逆变站邻近交流母线故障后会造成更多直流的连锁换相失败。由于减轻多直流间交互作用的措施多数投资较大,江苏电网应在实际运行时给予这些交流母线故障更多的关注。

关键词:江苏电网;多直流馈入;换相失败;多馈入交互作用因子

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)01-0051-07

0 引言

近年来随着我国高压直流输电工程的大量建设,电能需求较大的负荷中心很可能有多个直流落点而形成“多直流馈入受端电网”。根据“十三·五”规划,2018年江苏电网将形成一个多直流馈入受端电网。多直流馈入系统可以较好的解决电能的长距离传输和电力短缺问题,但多回直流与交流系统的混合大大增加了电网结构的复杂性,直流与直流、交流与直流之间的相互耦合作用很有可能造成连锁故障,扩大故障范围,加重故障后果^[1-3]。

在有多个直流落点的交直流混联电网中,受端交流系统或直流系统发生故障可能导致多回直流连锁换相失败^[4-5],使得直流电压降低、电流增大、直流传输功率波动,对电网造成一定冲击。连锁换相失败还可能引发更为严重的直流闭锁故障,出现直流功率中断、潮流大范围转移,危及受端电网的电压稳定性、功角稳定性以及频率稳定性^[6-9]。所以有必要对实际多馈入系统进行连锁换相失败分析,对系统采取预防和控制措施。

文献[10]指出可将多馈入交互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)看作衡量是否发生连锁换相失败的指标,减小交互作用因子可以降低连锁换相失败的可能性。文献[11]指出MIIF的大小仅与换流母线的自阻抗和互阻抗有关,可以利用阻抗矩阵快速判断换流母线处故障后是否会

引发连锁换相失败。文献[12]针对MIIF仅考虑换流母线间相互作用的问题,将其推广到任意交流母线与换流母线间的交互作用,提出了节点电压交互作用因子(voltage inter action factor, VIF),但未在实际系统中应用。文献[13]分析了直流分层接入下层间交互影响因子的计算方法并比较了直流分层接入与传统接入方式的优劣。文献[14—15]利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC仿真分析了电流源型高压直流输电线路故障下引发的过电压、过电流以及不同故障类型对换相失败的影响。

文中基于2018年江苏规划电网的丰大运行方式,采用中国电力科学研究院开发的PSD-BPA机电暂态程序,针对受端交流系统直流逆变站附近主要500 kV交流线路的三相永久性短路故障,考虑交流和直流、多直流之间的相互作用,研究了江苏多直流馈入电网发生连锁换相失败的原因,分析了MIIF和VIF在使用中需要注意的问题,为江苏电网的实际运行提供了相关参考。

1 江苏规划电网系统模型

目前,我国已经初步形成了2个复杂的多直流馈入区域电网,分别是南方电网和华东电网。江苏电网作为华东电网的重要组成部分,已有龙泉—政平、锦屏—同里2个直流落点。根据“十三·五”规划,2018年将有锡盟—泰州、晋北—南京两回特高压直流工程投入运行,其中泰州换流站按500 kV和1000 kV两个电压等级分层接入,同时还有泰州特—南京特、泰州特—苏州特两回特高压交流线路投入运行,形成有四回直流馈入的多直流馈入、特

收稿日期:2017-09-17;修回日期:2017-10-26

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20160678);国家电网公司科技项目(5210EF17001G)

高压交流与直流混联的受端电网。

在 2018 年丰大运行方式下,江苏规划电网共有有功负荷 95 373.8 MW,无功负荷 24 595 Mvar,江苏省内电源有功出力 72 464.8 MW,无功出力 43 202.7 Mvar。其中馈入江苏的四回直流锦屏—同里、龙泉—政平、晋北—南京、锡盟—泰州的额定传输功率分别为 3600×2 MW, 3000 MW, 4000×2 MW, 4998×2 MW,总额定传输功率为 24 596 MW,占江苏电网总负荷的 25.8%,对江苏电网的安全稳定运行有非常重大的意义。

江苏 2018 年规划电网四回直流及部分重要线路结构如图 1 所示,其中加粗部分表示 1000 kV 交流线路及变电站,其余均为 500 kV 变电站和交流线路。

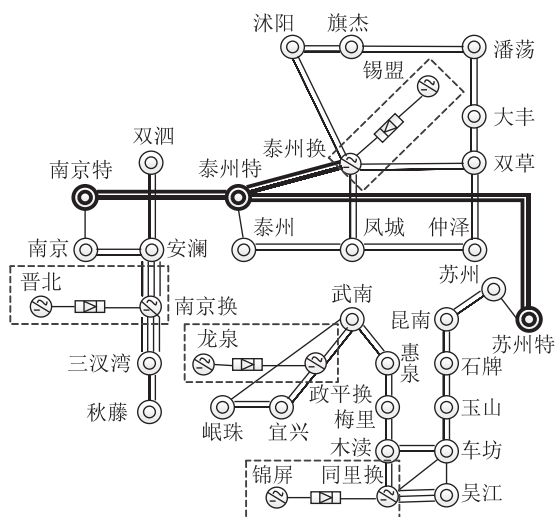


图 1 2018 年多直流馈入江苏电网结构

Fig.1 Diagram of multi-infeed HVDC system in Jiangsu in 2018

2 江苏电网多直流馈入直流输电系统连锁换相失败仿真

多直流馈入直流输电系统发生换相失败多为交流系统故障导致直流逆变站换流母线电压降低引起的,目前判断换相失败主要有最小电压降落法与最小熄弧角法 2 种方法^[16],文中采用最小电压降落法。根据实际工程运行经验,当逆变侧换流母线电压跌落至 0.8 p.u.以下且变化率超过 0.3 p.u./s 或电压低于 0.6 p.u.时则判断该直流系统发生换相失败,当故障后电压恢复至 0.75 p.u.时则判断恢复正常换相^[16]。

为分析受端交流系统故障引发直流系统同时或连续连锁换相失败的可能性,对受端各直流逆变站附近的重要 500 kV 交流线路模拟最为严重的母线出口处三相永久性短路故障,故障设置于 10 周

波,并于 15 周波时切除故障线路。根据 2018 年江苏规划电网的结构图,以泰州换流站附近交流线路泰州特—南京特于泰州特侧发生故障为例,仿真计算结果如图 2 所示,其中泰州换 1、泰州换 2 分别表示泰州换流站 500 kV 和 1000 kV 换流母线。

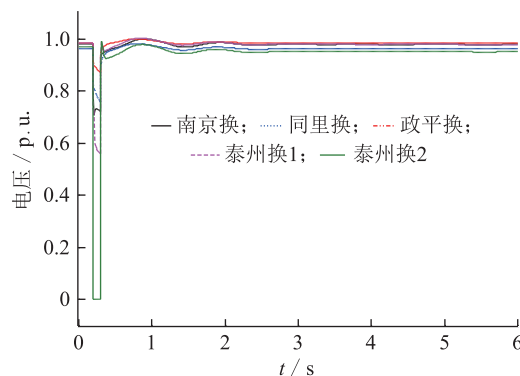


图 2 受端交流线路故障后换流母线电压

Fig.2 Voltage curve of commutation bus after fault in Jiangsu AC system

从仿真结果可见,当泰州换流站附近交流线路泰州特—南京特在泰州特侧发生三相永久性短路故障后政平换流站换流母线电压仍维持在 0.8 p.u.以上,同里换流站和南京换流站换流母线电压最低分别低至 0.756 p.u.和 0.706 p.u.,泰州换流站 500 kV 和 1000 kV 换流母线故障后电压分别低至 0.557 p.u.和 0。政平换流站不会发生连锁换相失败。同里换流站和南京换流站会发生连锁的换相失败,但交流故障切除后电压水平可以快速恢复从而恢复正常换相,换相失败持续时间小于 100 ms。泰州换流站会发生连锁的连续换相失败,故障持续时间 100 ms,在故障清除后可以快速恢复。

江苏电网受端直流逆变站附近重要交流线路故障后的换流母线电压仿真计算结果如表 1—4 所示,其中故障发生在线路首端的母线出口处。

表 1 南京换流站附近交流线路故障后换流母线电压

Tab.1 Voltage of commutation bus after faults occurring on some AC line near Nanjing inverter station

线路名称	直流逆变站换流母线最低电压/p.u.				
	南京换	政平换	同里换	泰州换 1	泰州换 2
南京换—三汉湾	0	0.86	0.836	0.676	0.674
南京换—安澜	0	0.859	0.835	0.676	0.675
安澜—南京	0.016	0.847	0.810	0.573	0.585
三汉湾—秋藤	0.122	0.826	0.834	0.686	0.684

根据表 1—4 的仿真结果,可得出如下结论:

(1) 南京换流站附近交流线路南京换—三汉湾、南京换—安澜、安澜—南京、三汉湾—秋藤发生三相短路后均会导致南京换流站和邻近的泰州换

表 2 同里换流站附近交流线路故障后换流母线电压

Tab.2 Voltage of commutation bus after faults occurring on some AC line near Tongli inverter station

线路名称	直流逆变站换流母线最低电压/p.u.				
	南京换	政平换	同里换	泰州换 1	泰州换 2
同里换—木渎	0.885	0.690	0	0.855	0.806
同里换—吴江	0.885	0.690	0	0.855	0.806
同里换—车坊	0.885	0.690	0	0.855	0.806
木渎—梅里	0.880	0.665	0.093	0.853	0.805
木渎—车坊	0.868	0.604	0.096	0.851	0.803
吴江—车坊	0.895	0.724	0.012	0.869	0.822

表 3 政平换流站附近交流线路故障后换流母线电压

Tab.3 Voltage of commutation bus after faults occurring on some AC line near Zhengping inverter station

线路名称	直流逆变站换流母线最低电压/p.u.				
	南京换	政平换	同里换	泰州换 1	泰州换 2
政平换—宜兴	0.838	0	0.450	0.867	0.824
政平换—武南	0.839	0	0.447	0.844	0.824
武南—惠泉	0.831	0.020	0.423	0.850	0.815
宜兴—岷珠	0.846	0.179	0.547	0.883	0.845

表 4 泰州换流站附近交流线路故障后换流母线电压

Tab.4 Voltage of commutation bus after faults occurring on some AC line near Taizhou inverter station

线路名称	直流逆变站换流母线最低电压/p.u.				
	南京换	政平换	同里换	泰州换 1	泰州换 2
南京特—泰州特	0.660	0.871	0.779	0.627	0.197
苏州特—泰州特	0.778	0.805	0.546	0.682	0.376
泰州换 2—泰州特	0.709	0.874	0.762	0.564	0
泰州换 1—凤城	0.808	0.935	0.873	0	0.700
泰州换 1—双草	0.810	0.932	0.874	0	0.700
泰州换 1—旗杰	0.813	0.930	0.876	0	0.710
凤城—仲洋	0.811	0.926	0.963	0.180	0.649
双草—大丰	0.818	0.932	0.872	0.180	0.719
旗杰—沐阳	0.767	0.933	0.880	0.315	0.748

流站短暂的换相失败。

(2) 同里换流站附近交流线路同里换—木渎、同里换—吴江、同里换—车坊、木渎—梅里、木渎—车坊、吴江—车坊发生三相短路故障后均会导致同里换流站和邻近的政平换流站短暂的换相失败。

(3) 政平换流站附近交流线路政平换—宜兴、政平换—武南、武南—惠泉、宜兴—岷珠发生三相短路故障后均会导致政平换流站和邻近的同里换流站短暂的换相失败。

(4) 泰州换流站附近交流线路泰州换 1—凤城、泰州换 1—双草、泰州换 1—旗杰、凤城—仲洋、双草—大丰发生三相短路故障后会导致泰州换流站短暂的换相失败，旗杰—沐阳发生三相短路故障

后会导泰州和南京换流站短暂的换相失败，南京特—泰州特、苏州特—泰州特、泰州换 2—泰州特发生三相短路故障后会导致同里、南京和泰州换流站同时换相失败。

此外，与泰州特—南京特三相短路后相同，上述由交流系统故障引起的直流系统连锁换相失败在交流故障清除后均可以快速恢复正常换相，换相失败持续时间不超过故障持续时间 100 ms。根据目前实际运行中直流保护的配置，当检测到由外部交流故障引起的换相失败时，保护延迟 300 ms 动作将直流闭锁，防止持续的换相失败对逆变器造成损伤，因此对于 2018 年江苏规划电网，受端交流线路故障只会引起直流系统短暂的换相失败，不会导致更为严重的直流闭锁。

3 江苏电网连锁换相失败原因分析

在含有直流落点的交直流混联系统中，直流换相失败是较为常见的故障之一，对于只含有 1 个直流落点的单馈入直流系统，受端系统发生交流故障导致换流母线电压降低时，换流阀在退出换相时不能及时恢复正向阻断能力从而导致直流换相失败。诱发换相失败的主要因素有受端交流系统的强度、故障位置、故障严重程度、换流母线处无功支撑强度等；而对于含有多个直流落点的多馈入直流系统，交流故障引发连锁换相失败的机理更为复杂，与单馈入系统相比多回直流落点之间的距离、相互之间的耦合关系都对是否会发生连锁换相失败有着不同程度的影响^[17-21]。

对于多馈入直流系统，目前主要采用 MIIF 指标来分析交直流系统的运行特性和相互影响关系，影响多直流连锁换相失败的主要因素在于多条直流之间的耦合关系，因此可用 MIIF 分析连锁换相的原因。MIIF 指在换流母线 i 投入对称三相电抗器使该母线电压下降 1% 时换流母线 j 的电压降与其比值，该指标计算相对复杂。文献[11—12]提出了 MIIF 的简便算法，将换流母线电压降落等效为节点注入电流的变化，利用节点阻抗矩阵可以实现指标的解析计算，并将 MIIF 推广至任一交流节点，提出了 VIF，计算公式如下：

$$f_{\text{VIF}i} = \frac{\Delta U_j}{1\% U_{i0}} = \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \right| \quad (1)$$

式中： $f_{\text{VIF}i}$ 为 VIF 值； i 为任一交流节点； j 为换流母线节点； U_{i0} 为节点 i 的初始电压； ΔU_j 为节点 j 的电压降落； Z_{ij} 为节点 i 与 j 间的互阻抗； Z_{ii} 为节点 i 的自阻抗。

当节点 i 为换流母线节点时,上述公式则为 $f_{\text{MIIF}ji}$,即 MIIF 值,可见 MIIF 是 VIF 的一个特例,VIF 相比 MIIF 考虑了故障位置不同时对换流母线电压的影响。

3.1 直流换流母线处故障导致连锁换相失败分析

$f_{\text{MIIF}ji}$ 值越大则表明 i, j 两回直流间的联系越紧密,当 $f_{\text{MIIF}ji} < 0.15$ 且直流 i 与 j 传输功率相差不大时,可认为两回直流间没有相互作用,对其分析时可做单馈入直流系统处理^[22]。

利用式(1)对馈入江苏电网的各直流的 $f_{\text{MIIF}ji}$ 进行计算,以分析江苏电网的连锁换相失败,计算结果如表 5 所示。

表 5 江苏电网各直流 $f_{\text{MIIF}ji}$
Tab.5 MIIF of multi-infeed HVDC system in Jiangsu power grid

母线 i	母线 j				
	南京换	同里换	政平换	泰州换 1	泰州换 2
南京换	1	0.058	0.092	0.149	0.211
同里换	0.049	1	0.217	0.049	0.077
政平换	0.105	0.298	1	0.067	0.067
泰州换 1	0.089	0.035	0.035	1	0.203
泰州换 2	0.175	0.077	0.049	0.284	1

结果显示馈入江苏电网的 4 回直流各换流母线间共 20 个 f_{MIIF} ,仅有 8 个超过 0.1,6 个超过 0.15,可见江苏电网的某一回直流在换流母线处的电压波动对其余直流换流母线电压的影响较小,四回直流间的相互联系程度总体上较弱。

根据江苏电网实际的故障仿真结果,对于 $f_{\text{MIIF}ji} > 0.15$ 的直流换流母线,当在换流母线处发生三相短路,电压短时降为 0 后均会使相应的另一换流母线电压大幅下降从而导致连锁的换相失败。南京换对泰州换 1 的 f_{MIIF} 为 0.149,接近 0.15,因此当南京换流站换流母线处发生三相短路,电压降为 0 后也会使泰州换 1 换流母线电压有较大跌落而导致连锁换相失败。泰州换 2 换流母线对同里换流母线 f_{MIIF} 仅为 0.077,但两回直流的传输功率相差较大,该 f_{MIIF} 并不能很好辨别两回直流间的联系,实际当泰州换 2 换流母线电压降为 0 后也会导致同里换流站短时的换相失败。

综合以上分析,2018 年江苏规划电网在直流逆变站换流母线处发生三相短路导致连锁换相失败的主要原因是部分换流母线间的 f_{MIIF} 较大,不能将其当做单馈入直流处理,直流之间存在较大的相互作用,当某一换流母线处发生三相短路故障时电压会瞬时下降为 0,使得本直流发生换相失败,又因电

压跌落幅度非常大,从而也会使相应的另一换流母线电压有较大跌落,进而引发连锁换相失败。

3.2 非换流母线处故障导致连锁换相失败分析

利用式(1)对江苏电网受端换流站附近部分重要交流节点的 $f_{\text{VIF}ji}$ 值计算如表 6 所示:

表 6 江苏电网重要交流节点 $f_{\text{VIF}ji}$
Tab.6 $f_{\text{VIF}ji}$ of some AC buses in Jiangsu power grid

母线 i	母线 j				
	南京换	同里换	政平换	泰州换 1	泰州换 2
苏州特	0.282	0.089	0.056	0.252	0.762
南京特	0.123	0.199	0.078	0.175	0.563
凤城	0.104	0.041	0.041	0.776	0.294
双草	0.098	0.038	0.038	0.783	0.197
旗杰	0.143	0.045	0	0.595	0.14
安澜	0.911	0.064	0.064	0.201	0.274
三汉湾	0.778	0.064	0.101	0.101	0.186
木渎	0.060	0.878	0.266	0.06	0.09
吴江	0.047	0.968	0.179	0.047	0.074
武南	0.070	0.313	0.951	0.070	0.070
宜兴	0.092	0.220	0.791	0.058	0.058

对比表 6 与表 5,可见受端交流节点的 f_{VIF} 相比各换流母线的 f_{VIF} 都偏高。从 VIF 和 MIIF 的定义出发,一方面逆变站紧邻的交流节点与对应的直流换流母线之间电气距离较小,互阻抗较大,所以必然相应的交互作用因子较大;另一方面,相比于馈入受端的直流换流母线,邻近的交流母线距离另外三回直流的电气距离更近,之间的互阻抗更大,所以 $f_{\text{VIF}ji}$ 较大。当故障导致节点电压跌落时,相比换流母线,逆变站近区的交流母线对另外三回直流的换流母线电压影响更大,会造成更严重的电压下降,邻近直流发生换相失败的可能性更大。

根据 $f_{\text{VIF}ji}$ 计算公式,当受端电网发生故障,任意交流母线 i 电压发生变化后任意换流母线 j 的电压变化为:

$$\Delta U_j = f_{\text{VIF}ji} U_{io} \frac{U_{jN}}{U_{iN}} = \left| \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \right| U_{io} \frac{U_{jN}}{U_{iN}} \quad (2)$$

式中: U_{jN} 为换流母线 j 的额定电压; U_{iN} 为节点 i 的额定电压。

利用式(2),当在上述交流节点母线处发生三相短路故障导致节点电压瞬时为 0 后,各换流母线的电压计算如表 7 所示。

对比表 7 与表 1—4 的结果,可见,利用 $f_{\text{VIF}ji}$ 快速计算换流母线电压时,除了凤城故障后同里换流站电压较仿真结果低 0.039 p.u.外,其余计算结果均比仿真结果高,且绝大多数偏差值在 0.1 p.u. 以下。当苏州特母线发生故障后利用 $f_{\text{VIF}ji}$ 计算得各换流母

表7 采用 f_{VIFji} 快速计算换流母线电压Tab.7 Commutation bus voltage calculated by f_{VIFji} method

母线 i	母线 j				
	南京换	同里换	政平换	泰州换 1	泰州换 2
南京特	0.704	0.877	0.931	0.737	0.224
苏州特	0.862	0.773	0.911	0.816	0.430
凤城	0.879	0.924	0.946	0.228	0.684
双草	0.884	0.927	0.949	0.215	0.777
旗杰	0.839	0.919	0.986	0.396	0.832
安澜	0.084	0.901	0.923	0.786	0.700
三汊湾	0.228	0.902	0.888	0.886	0.790
木渎	0.922	0.118	0.730	0.926	0.883
吴江	0.935	0.028	0.813	0.939	0.898
武南	0.911	0.656	0.049	0.915	0.901
宜兴	0.889	0.747	0.207	0.927	0.913

线电压总体偏差最大,其中计算得同里换流站电压偏差达到 0.227 p.u.。此外,同里换流站的计算结果中有 3 个偏差量达到 0.2 p.u.,其计算精度在四回直流中最低。

用此方法计算故障后换流母线处的电压整体结果偏高的原因在于利用节点阻抗矩阵快速计算 f_{VIFji} 的过程中对系统进行了理想化的简化处理,认为各节点的注入电流会保持不变,而实际故障后电流会有所增大。根据以上计算结果与文中采用的换相失败最小电压降落判据,在上述交流母线处发生三相短路故障后将会导致邻近的直流逆变站换相失败。对于上一节分析所得 f_{MIFji} 较大的相应直流逆变站多数也将发生连锁换相失败。对于部分与远方直流相互作用比相邻直流换流母线强的交流节点,由于 f_{VIFji} 计算结果偏高,按此方法分析并不会引起更多的连锁换相失败,但仿真分析结果显示会导致更多直流的连锁换相失败。因此建议在使用 f_{VIFji} 判断是否会发生连锁换相失败时设置较高阈值。

综合以上分析,对于 2018 年江苏规划电网,当在直流逆变站附近交流母线侧发生三相短路故障后,由于与相邻直流逆变站电气距离近,相互作用大,将导致该回直流以及 f_{MIFji} 值较大的对应直流换流母线电压大幅跌落,从而引发连锁换相失败。又因直流逆变站附近交流母线相比本直流与远方直流电气距离更近,电压相互作用更强,因此会导致比换流母线处三相短路故障更多直流的连锁换相失败。

此外,对于 2018 年江苏规划电网,无论是在直流换流母线还是其余交流母线处发生三相短路故

障,直流连锁换相失败持续的时间都很短暂,在故障清除后均可以迅速恢复正常换相。这是由于江苏电网的无功电源非常充足,无功电压支撑能力强,即使在系统三相短路后直流换流母线电压下降而导致直流并联无功电容器无功输出减小的情况下仍然有足够的无功支撑能力,可以使系统电压快速恢复正常水平,在不采取任何稳定措施的情况下不会引起直流闭锁,不会影响系统的稳定性。

4 结论

文中基于 2018 年多直流馈入江苏规划电网的丰大运行方式,针对直流逆变站近区 500 kV 交流线路故障,对江苏电网连锁换相失败进行了仿真分析,研究结果表明:

(1) 馈入江苏电网的四回直流中,同里换流站与政平换流站、泰州换流站的 500 kV 换流母线与 1000 kV 换流母线、泰州换流站 1000 kV 换流母线与南京换流站两两之间相互联系较为紧密,换流母线电压交互作用较强,当在其中一回直流逆变站换流母线处发生三相短路故障后会导致本回直流以及相应的另一回直流发生连锁的换相失败。

(2) 泰州特—南京特、泰州特—苏州特是 2018 年江苏规划电网非常重要的交流通道,当其发生三相短路故障时会导致三回直流同时连锁换相失败,对电网造较大冲击,因此在实际运行调度中应给予足够的重视。

(3) 由于江苏电网的无功支撑能力很强,在交流故障清除后直流即可恢复正常换相,换相失败持续时间很短,对系统运行造成的影响很小,因此 2018 年江苏规划电网可以保持现有的架构。

(4) 直流逆变站相邻交流母线处发生三相短路故障后会导致本回直流以及与其联系紧密的另一回直流连锁换相失败,同时由于直流逆变站相邻交流母线距离远方直流电气距离更近,交互作用更强,所以会导致比在换流母线处发生三相短路后更多的直流连锁换相失败。

(5) 当采用由节点阻抗矩阵快速计算的 f_{MIFji} 值分析多回直流之间的相互联系时,若 $f_{MIFji} > 0.15$ 则可认为两回直流存在较强交互作用,存在连锁换相失败风险;若 $f_{MIFji} < 0.15$ 且两回直流传输功率相差较小时可认为两回直流之间没有相互联系,不会发生连锁换相失败。

参考文献:

[1] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术,2008,32(11):7-12.

LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage

- stability of multi-infeed HVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.
- [2] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
LIN Lingxue, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46.
- [3] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Current situation of research on multi-infeed AC/DC power systems [J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [4] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 193-194.
LI Xinyuan. Operation and control of HVDC transmission system [M]. Beijing: Science Press, 1998: 193-194.
- [5] KUNDUR P. 电力系统稳定和控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 331-332.
KUNDUR P. Power system stability and control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 331-332.
- [6] 李新年, 王明新. 换流站换相失败相关问题及应对措施研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
LI Xinnian, WANG Mingxin. Study on problems and countermeasures of commutation failure in converter station [R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011.
- [7] 彭堃, 陈星莺, 李斌, 等. 气象环境对电网负荷的影响因素分析[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(1): 8-13.
PENG Kun, CHEN Xingying, LI Bin, et al. Analysis of the impact factors of meteorological environment on power load [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(1): 8-13.
- [8] LU Pengfei, LI Xinnian, CHEN Lingfang, et al. A new method of preventing commutation failure in HVDC based on sin-cos components detection [C] // International Conference on Electrical Engineering. Yong Pyong Korea: ICEE, 2006: 2-11.
- [9] 孙景强, 郭小江, 张健, 等. 多馈入直流输电系统受端电网动态特性[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 57-60, 87.
SUN Jingqiang, GUO Xiaojiang, ZHANG Jian, et al. Dynamic characteristics of receiving-end of multi-infeed HVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 57-60, 87.
- [10] 刘建, 李兴源, 傅孝韬, 等. 多馈入短路比及多馈入交互作用因子与换相失败的关系[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 20-24.
LIU Jian, LI Xingyuan, FU Xiaotao, et al. Relationship of multi-infeed short circuit ratio and multi-infeed interaction factor with commutation failure [J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 20-24.
- [11] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114.
SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114.
- [12] 陈政, 周保荣, 洪潮, 等. 基于临界阻抗边界的多馈直流系统同时故障风险评估[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 874-878.
CHEN Zheng, ZHOU Baorong, HONG Chao, et al. Critical impedance boundary-based risk assessment on simultaneous faults in multi-infeed DC transmission system [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 874-878.
- [13] 管永高, 张诗滔, 许文超. 特高压直流分层接入方式下层间交互影响研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 32-37.
GUAN Yonggao, ZHANG Shitao, XU Wenchao. Study on hierarchical interaction of UHVDC hierarchical connection mode [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 32-37.
- [14] 徐强, 谢天喜, 吴珺, 等. ± 800 kV 锦苏直流工程全压启动故障仿真分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(4): 8-11.
XU Qiang, XIE Tianxi, WU Jun, et al. Simulation and analysis on full-voltage starting faults in ± 800 kV Jinping-Suzhou UHVDC project [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(4): 8-11.
- [15] 李猛, 夏成军, 杜兆斌. 混合直流双桥换相失败机理及抑制措施研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 47-53.
LI Meng, XIA Chengjun, DU Zhaobin. Research on the mechanism and suppression method of double bridge discontinuous commutation failure in hybrid HVDC [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 47-53.
- [16] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 2015年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 9-15.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China power grids planned for UHV power grids in 2015 [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15.
- [17] 蔡泽祥, 朱浩骏, 白雪峰. 多馈入直流输电系统的动态特性及稳定控制与分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 1-8.
CAI Zexiang, ZHU Haojun, BAI Xuefeng. Dynamic characteristics stability control and analysis of multi-infeed HVDC transmission systems [J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 1-8.
- [18] 项玲, 郑建勇, 胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 29-33.
XIANG Ling, ZHENG Jianyong, HU Minqiang. Study on commutation failure in MTDC and MDC systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [19] 杜斌, 徐敏, 柳勇军, 等. 异步联网后云南电网直流闭锁故障稳定特性及控制措施[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 72-76.
DU Bin, XU Min, LIU Yongjun, et al. Stability characteristic of DC interlocking fault of Yunnan Power Grid after asynchronous interconnection and control measures [J]. Guangdong

Electric Power, 2016, 29(3): 72-76.

- [20] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败
的判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.

HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Criteria for
simulation analysis on commutation failure in criteria for
HVDC transmission systems [J]. Power System Technology,
2007, 31(1): 20-24.

- [21] DENIS L H A, GORAN A. Analysis of voltage and power inter-
actions in multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions
on Power Delivery, 2013, 28(2): 816-824.

- [22] CIGRE Working Group B4. 41. Systems with multiple DC
infeed [R]. Paris: CIGRE, 2008.

作者简介:



周 前

周 前(1978—),男,博士,研究员级高级
工程师,从事电力系统分析与计算研究工作
(E-mail: zhouqiandky@sina.com);

张 潮(1994—),男,硕士研究生,研究方
向为多直流馈入混联系统稳定运行(E-mail:
chaoz_seu@163.com);

张宁宇(1985—),男,博士,工程师,从事
电力系统优化与运行、柔性交直流输电研究工
作(E-mail: zhangny190@163.com)。

Analysis on Commutation Failures in Multi-infeed HVDC System in Planning Power Grid of Jiangsu in 2018

ZHOU Qian¹, ZHANG Chao², ZHANG Ningyu¹, SHAO Yuwei², WANG Sicheng², HAN Song²

(1. State Grid Key Laboratory of Substation Intelligent Equipment Testing Technology

(Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the multi-infeed planning power grid of Jiangsu in 2018, the chain commutation failure and HVDC pole blocking problem after three short-circuit faults occurring in AC system are studied by using electromechanical transient simulation software PSD-PBA. Besides, the multi-infeed interaction factor(MIIF) and voltage interaction factor's(VIF) laws of usage in power grid are summarized. The results show that several important AC lines' short-circuit fault will lead to more than one DC inverter's commutation failure because of the interaction between 4 HVDC transmission systems. In addition, compared to phase-to-ground faults occurring in commutation buses, faults occurring in AC line near inverter will cause more chain commutation failures because of the different coupling relationships. Since most measures of mitigating the interaction between HVDC transmission systems require a large investment, those AC faults should be given enough attention in Jiangsu power grid.

Key words: Jiangsu power grid; multi-infeed HVDC system; commutation failure; multi-infeed interaction factor

(编辑 方 晶)