

逆变器换相失败发生机理及其抑制方法研究

黄浩宇 汪伟

国网江西省电力有限公司九江供电分公司

摘要: 首先对逆变器换相失败机理进行解析,明确了直流电流对换相失败的影响。其次,对VDCOL及动态VDCOL的参数进行改进,引入simplex算法对VDCOL参数优化,达到在交直流混合系统受端换流母线发生严重的三相短路故障时,减小受端系统逆变器消耗无功的峰值同时加快受端有功传输恢复速度,从而有效的抑制后续换相失败,在防止系统电压及功角失稳,具有一定的作用;最后,基于PSCAD/EMTDC仿真验证参数优化的有效性。

关键词: 换流器; 换相失败; VDCOL; 优化

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-627X.2022.11.109

引言

近年来我国高压直流技术迅速发展,交直流系统规模日趋扩大,电力系统网络庞大复杂,以往建立的电网的静态及暂态稳定性理论难以支撑当今复合大电网系统可靠性评估。就南方电网而言已经形成了多馈入直流交直流混合系统,规划到2018年将形成八回路(天广直流、贵广I直流、贵广II直流、三广直流、云广直流、糯扎渡直流、溪洛渡直流、鲁西直流)直流落点均在广东的混合复杂电网^[1]。“强直弱交”系统使交直流相互影响的问题日趋突出,尤其是换流器换相失败的发生,给电网系统及用电用户造成了巨大冲击和经济损失,据统计就2010年11月到2012年六月期间南方电网已由于换相失败而发生了多起南网主网变压器跳闸事故,严重影响

到国民日常生活的正常有序的进行。因而对于换相失败的发生发展机理的研究及如何有效的抑制其发生成了电网安全运行的重要课题^[2]。

本文从换相失败的宏观及微观机理进行定性分析,推导出发生换相失败的主要因素,进而究其主要因素,对VDCOL参数进行优化,减小故障后换流器无功消耗的峰值数值同时加快有功传输的恢复;基于电磁暂态仿真平台,以某实际直流系统为原型,搭建仿真系统,在单馈入直流相系统的受端换流母线上作短路实例研究,基于Simplex算法对VDCOL控制系统参数进行改进优化,从而提高受端换流器的暂态稳定性。

一、换流器机理分析

(一) 换相失败发生原理及分析

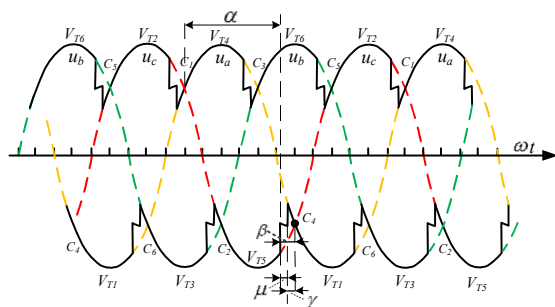


图1 6脉动逆变器电压波形图

换相失败在微观机理上分析。换相时晶闸管在反向电压作用下,晶闸管载流子通过迁移、扩散及复合重新建立电势壁垒,到完全恢复阻断能力需要一定时间。目前晶闸管去游离恢复时间约为350微秒,晶闸管恢复所留裕度与其制作构造有关,临界最小熄弧角为7左右,一般都是以7作为发生换相失败的判据^[3-5]。

在宏观上进行定性分析。对换流器换相宏观特性如图1,所示。熄弧角是由多个因素决定的,如超前触发角、换相角及电压过零点漂移角。

对于多直流落点系统,逆变器之间电气距离将导致换相失败更容易发生。此外,交流侧故障点与换流器的

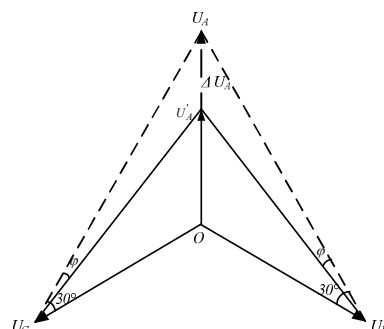


图2 单相故障时电压过零点漂移示意图

电气距离、短路严重程度也会导致到多直流系统发生换相失败。

(二) 换相失败对直流输电系统的影响

逆变器发生换相失败将导致直流电流急剧上升,整流侧电流调节器增大触发角以限制直流电流,此时整流器将消耗更多的无功功率,约为直流输送功率的30%~40%,使整流侧换相电压下降。而在逆变侧,由于换相失败后逆变器侧直流电压为零,直流功率也降到零,从而逆变器消耗无功也为零,结果使滤波器和无功补偿装置发出的无功流入交流系统,将导致弱交流系统出现过电压。交直流互联系统故障期间,直流系统应该

输送尽可能多的功率，且在交流故障切除后使直流功率快速恢复，以缓解交流系统功率失衡，而换相失败是导致直流功率不能快速恢复的主要原因，因而过快的直流功率恢复可能造成后续换相失败及交流系统电压和功角失稳，产生严重事故。

由于换相失败带来以上严重影响，因而亟须采取必要继电保护措施防止换相失败及后续换相失败的发生，本文以下引入基于VDCOL控制的方法来抑制换相失败的发生，且依据目前的提出的方案在常规VDCOL基础上改进其控制性能，进一步提升直流系统故障后的恢复特性。

二、VDCOL控制参数优化

(一) VDCOL控制机理

VDCOL作用是在直流电压或交流电压跌落到某个指定值时对直流电流指令进行限制。典型VDCOL控制模块

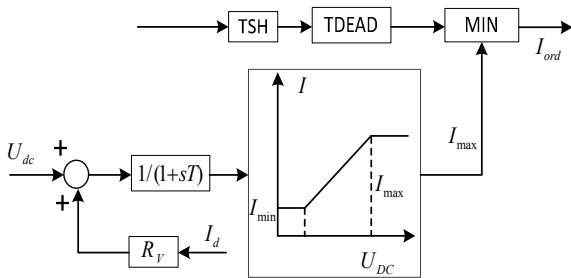


图3 VDCOL经典模型

(二) VDCOL控制

常规固定参数VDCOL特性如图4所示，为直流电压、为交流换相电压、分别为最大、最小直流电流、分别为高、低电压门槛值。

固定参数VDCOL主要受4个参数（、、、）影响，为固定值。其控制在系统电压下降和恢复期间U-I曲线重合，直流电流指令沿同一条线段变化，未考虑直流系统恢复期间对所处交流系统产生大量无功的特殊性。且对于多个逆变站落点交流系统其特性曲线受影响比较严重，易产生电压及功角失稳、送受端有功失衡。

(三) 基于simplex算法VDCOL参数优化

Simplex算法是基于几何形状考虑的求多维函数极值的启发式优化算法，可以对20个变量以内的多变量进行优化。以下基于Simplex算法建立优化对象选定为VD_H、VD_L和ID_L。对ID_H而言，其数值增大等价于VD_H减少，而当其减少时，将改变VDCOL静特性的结构，因此ID_H不参与优化，始终保持为1.0 p.u. VDCOL的输入输出一阶环节的时间常数也不参与优化。

根据上述内容，建立优化模型如式（6），其优化效果为故障后系统恢复过程中减小受端无功消耗峰值，同时加快受端传输有功恢复速度。

如图3所示。

其中，为直流电流给定值，它与经过低压限流后的最大允许电流值作比较，较小的作为电流指令值；为复合电阻，用于确定VDCOL的启动电压是由线路上哪一点的直流电压决定的；为滤波环节时间常数；TSH为采样保持环节，TDEAD为同步环节^[3-4]。

当落点交流电压或直流电流下降巨大，换流器将从交流系统吸收大量无功，不利于直流落点交流电压稳定。VDCOL作用是在交流电压或直流电压降低到某个指定值时，对直流电流进行限制。发生一次换相失败后，当电压很低而电流很大时很容易再次发生换相失败，这时VDCOL强制降低直流电流，使系统在恢复过程中减小对交流系统无功需求，利于维持交流电压和减小逆变器后续换相失败的可能性^[3-5]。

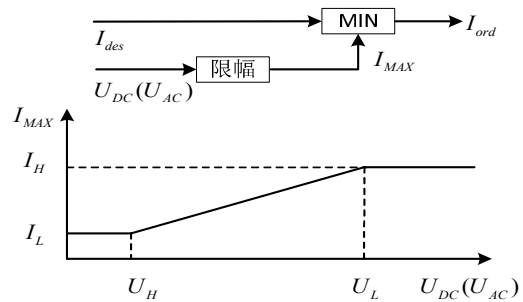


图4 常规VDCOL特性

$$\begin{cases} \min f(x) = (\omega_p \Delta E_{pu} + \omega_q \Delta Q_{pu}) \\ x = [VD_H, VD_L, ID_L]^T \\ \Delta E_{pu} = \Delta E / \Delta E_0 - 1.0 \\ \Delta Q_{pu} = Q_{peak} / Q_{peak0} - 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， ω_p 和 ω_q 分别有功缺额和无功峰值的权值， $\Delta E_{p,u}$ 和 $Q_{p,u}$ 为有功缺额和无功峰值，本文 $\omega_p = \omega_q = 0.5$ ； ΔE_0 和 Q_{peak0} 为原VDCOL参数下相应计算结果， ΔE 和 Q_{peak} 为改动VDCOL参数后相应计算结果。

采用PSCAD/EMTDC的Multirun模块进行全局遍历寻优，寻优过程中三个变量的变化步长均设为0.1p.u.，同时剔除不合理的参数组合，如 $VD_L > VD_H$ 的情形。

三、算例分析

如图5所示为单馈入直流模型，其VDCOL原始参数如表1所示。在受端换流母线处发生三相短路，持续时间为100ms优化前后对比曲线如图6所示，优化前后受端传输有功、消耗无功等对比如图7所示。

原始参数下：VD_H=0.450000；VD_L=0.300000；ID_L=0.400000。其目标函数值为 $f(x) = 2.001520$ 优化结果为：VD_H=0.447123；VD_L=0.098230；ID_L=0.703165； $\min f(x) = 1.856369$ 。

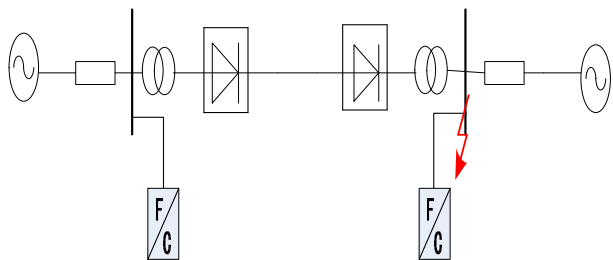


图5 单馈入直流模型

由图7可知，故障后恢复期间，优化后受端换流器消耗无功峰值减小，有功传输恢复速度加快，验证了优化的有效性。

表1 VDCOL控制参数

仿真模型VDCOL原始参数			
送端		受端	
VD	Id	VD	Id
-1	0.4	-1	0.1
0	0.4	0	0.1
0.3 (VD_L)	0.4 (ID_L)	0.45 (VD_L)	0.1 (ID_L)
0.45 (VD_H)	1.0 (ID_H)	0.65 (VD_H)	1.0 (ID_H)
0.65 (VD_U)	2	0.95 (VD_U)	2
2	2	2	2

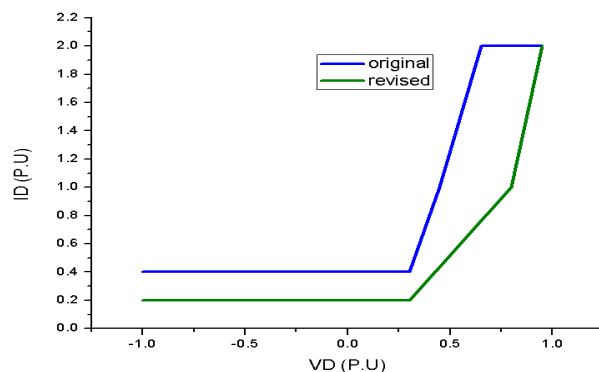


图6 优化前后VDCOL曲线

四、结论

(1) 换相失败主要原因是熄弧角过小，引发直流换相失败因素主要有逆变侧交流线电压下降、直流电流剧增、超前触发角过小及直流逆变器内部故障。

(2) 基于Simplex算法VDCOL参数优化改进能减小故障恢复期间受端无功消耗峰值，加快有功传输的恢复。

(3) 对于受端多直流落点系统改进新型VDCOL有一定的局限性。本文只对对称故障且发生在逆变站附近故障进行了验证。

参考文献

[1] 李新年, 易君, 李柏青等. 直流输电系统换相失

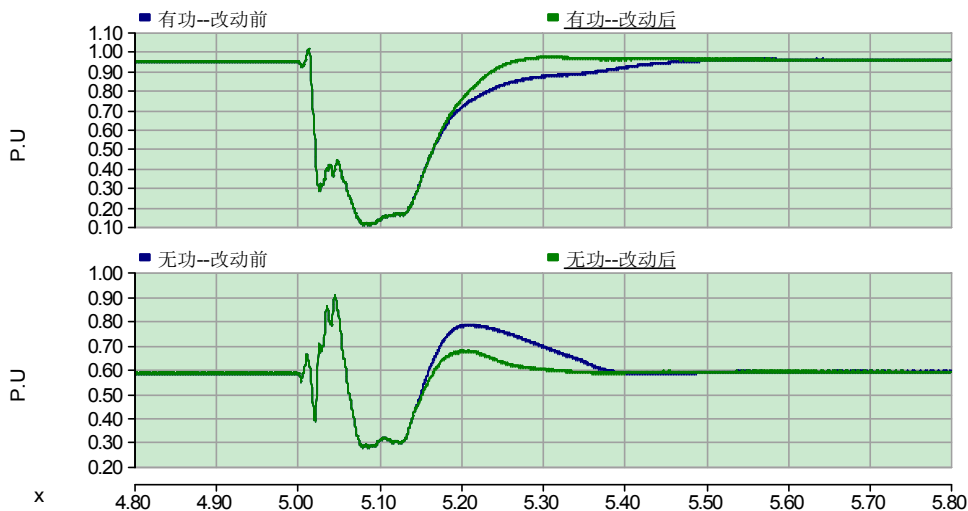


图7 VDCOL改进前后、有功、无功对比图

故障仿真分析及运行情况统计. 电网技术[J], 2012, 36, 6: 266-271

[2] 艾飞, 李兴源, 李伟等. HVDC换相失败判据及其恢复策略的研究. 四川电力技术[J], 2008, 31, 4, 10-13

[3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2011. 56-85

[4] 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. 电网技术[J], 2006, 30, 17. 40-46

[5] 黄玉东. 高压直流输电换相失败的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006, 25-28

[6] 黄浩宇. 多直流馈入系统恢复特性及协调有序恢复策略研究[D]. 华南理工大学, 2016.