

直流整流站最小 α 限制器对系统稳定性的影响

金子开¹, 滕予非²

(1. 国网辽宁省电力公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 特高压直流输电系统(ultra high voltage direct current, UHVDC) 是一个将直流和交流互相转化进行长距离、高电压、大容量传输的系统。UHVDC 输电系统动态特性主要取决于电压受控电流指令限制器(voltage dependent current order limiter, VDCOL) 和电流控制放大器(current control amplifier, CCA)。当整流站发生交流故障, α 角快速降低到允许的最小值; 但当故障消失, 交流电压恢复后, 如果 α 太小直流电流会很大。为防止这种情况的发生, 引入整流站最小 α 角限制器功能(rectifier alpha min limiter, RAML)。RAML 的存在会对送端交流系统电压稳定性产生影响。对 RAML 的结构和功能进行说明, 分别用戴维南等值系统或者单机无穷大系统和一个发电机组代替交流系统, 分析 RAML 的存在对于直流系统和交流系统的影响并用等面积法则进行解释说明。最后, 用 IEEE 10 机 39 节点模型模拟实际的交流系统, 仿真结果验证了 RAML 对系统稳定性的影响。

关键词: 特高压直流; 整流站; 整流站最小 α 角限制器; 电压稳定

Abstract: The ultra high voltage direct current (UHVDC), which is responsible for the transformation between DC and AC, can deliver long-range, high-voltage and large-capacity power. The voltage dependent current order limiter (VDCOL) and the current control amplifier (CCA) are the key factors for the dynamic characteristic. The firing angle will be quickly reduced to the allowed minimum value when faults occur at the AC side of rectifier station. With the AC faults disappearing and the AC voltage recovering, the direct current will increase quickly if the firing angle is too small. The module of rectifier alpha min limiter (RAML) is adopted to prevent that situation. RAML will affect the voltage stability of the sending end system. The structure and functions of RAML are described. The influence of RAML on DC and AC systems is analyzed using Thevenin equivalent system or single machine infinite bus power system with a generator set respectively, and is described by equal area rule. Finally, the influence of RAML on voltage stability is verified through the results of IEEE 10-machine 39-bus system.

Key words: ultra high voltage direct current (UHVDC); rectifier station; rectifier alpha min limiter; voltage stability

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0037-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.008

0 引言

由于中国能源分布不均匀, 西多东少, 而负荷分布恰好相反, 为了解决能源配置和用电问题, 交流输电作为传统输电方式在长距离输电情况下经济效益显著下降; 而直流输电是电力系统中迅速发展的一项新技术, 主要应用于远距离大容量输电、电力系统联网等方面, 所以直流输电受到了重视, 在中国加大了科研投入和直流工程建设^[1-3]。由于工程造价低, 线路有功损耗小、不受系统稳定极限的限制以及输送功率的大小和方向可以快速控制和调节等特点, 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2015M582543)

直流输电是一种很有吸引力的输电方式。

直流输电具有送电容量大、交直流耦合作用强、换流器无功消耗多等特点, 交直流混联电网安全稳定分析变得更加复杂^[4]。文献[5]详细分析了直流控制系统的配置要求、分层结构、基本控制原理和基本控制方式及其之间联系方式。文献[6]提出了用于高压直流系统控制研究的标准模型(CIGRE), 涵盖了结构和参数。文献[7]基于实际直流工程软件 Hidraw, 研究了 ABB 直流控制保护系统中的换流阀触发控制环节(converter firing control, CFC), 提出了两种提高控制系统中锁相环精度的方法。文献[8]研究了锁相环(phase-locked loop, PLL)对 HVDC 系统启动过程的影响。

文献[9]分析整流站交流侧母线电压大幅扰动过程中整流器和整流站的动态无功特性,并分析了动态无功特性的影响因素为低压限流启动点、直流控制方式和定功率控制电压测量时间常数。文献[10-11]分析了在逆变侧交流母线电压大幅波动过程中,逆变站的综合动态功率特性,分析了逆变站无功特性的影响因素、直流受端系统电压失稳机理、直流逆变站对系统振荡阻尼特性影响。文献[12-14]从影响因素、分析方法、稳定判据、应对措施等方面,较为系统地阐述了直流馈入电网,尤其是多直流馈入电网的电压稳定问题。

这里首先分析最小α角限制器(rectifier alpha min limiter, RAML)在UHVDC中起到的作用,并对其结构和功能进行解释说明。用戴维南等值系统等效代替交流系统,分析RAML的存在对直流系统的影响,再用单机无穷大系统配1个发电机组等效代替交流系统,分析RAML对直流系统和交流系统的影响并用等面积法则进行解释说明。最后,用IEEE 10机39节点模型模拟实际的交流系统,仿真验证RAML对系统稳定性的影响。

1 直流输电稳态工况计算常用公式

整流站极对地直流电压 U_{d1} 为

$$U_{d1} = N_1 \left(1.35 U \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d \right) \quad (1)$$

逆变站极对地直流电压 U_{d2} 为

$$U_{d2} = N_2 \left(1.35 U_2 \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_{r2} I_d \right) \quad (2)$$

$$U_{d2} = N_2 \left(1.35 U_2 \cos \gamma - \frac{3}{\pi} X_{r2} I_d \right) \quad (3)$$

直流电流 I_d 为

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R} \quad (4)$$

直流功率 p_d 为

$$p_{d1} = U_{d1} I_d \quad (5)$$

式中: N_1 、 N_2 为整流站和逆变站每极中的6脉动换流器数,通常为2,最多为4; U_1 、 U_2 为整流站和逆变站换流变压器阀侧空载线电压有效值, kV; X_{r1} 、 X_{r2} 为整流站和逆变站每相的换相电抗, Ω ; α 、 β 分别为整流器和逆变器的触发角, $^\circ$; γ 为逆变器的关断角, $^\circ$; I_d 为直流电流平均值, A。

2 RAML 的结构和功能

当整流站发生交流故障, α 角快速降低到允许的最小值,但当故障消失,交流电压恢复后,如果 α 太小直流电流会很大。为了防止这种情况的发生,引入整流站最小 α 角限制器功能(RAML)。此功能检测到较低的交流电压,就将 α 角限制在设置的最小 α 角值左右。

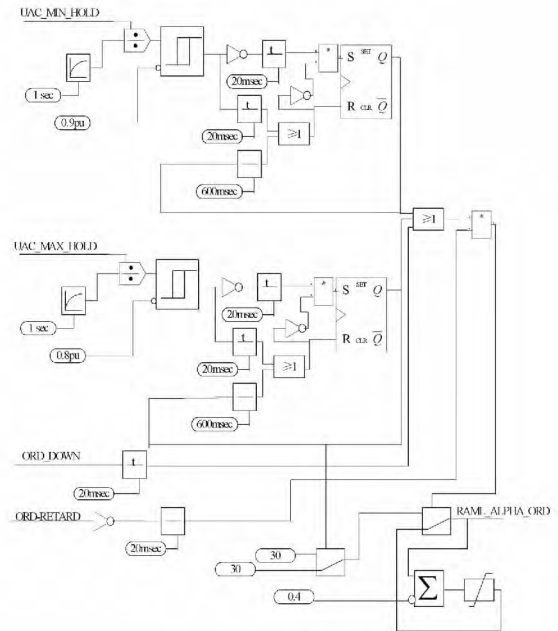


图1 RAML 功能框图

在实际的直流控保系统中,常利用交流电压包络线对交流系统电压进行检测。实际系统的上包络线为 $U_{AC_MAX_HOLD}$, 实际系统的下包络线为 $U_{AC_MIN_HOLD}$, 实际的直流控制保护系统则利用 $U_{AC_MAX_HOLD}$ 与 $U_{AC_MIN_HOLD}$ 来判断交流系统的电压降落。

此功能包括两个并列部分,一个检测单相故障,把 $U_{AC_MIN_HOLD}$ 和 0.9 倍的正常电压相比较。另一个检测三相故障,把 $U_{AC_MAX_HOLD}$ 和 0.8 倍的正常电压相比较。

3 RAML 环节对直流系统的影响

系统发生故障时,整流侧触发角一般会达到最小值(5°);过低的触发角会导致系统电压恢复时直流电流迅速增大,为防止这一现象发生,引入 RAML 功能。该功能一旦检测到较低的交流电压,就会将 α 角最小值限制在 30° 左右,而在交流故障消除后 RAML 输出的 α 角最小值限制会以 $0.4^\circ/2\text{ms}$ 的速度降低至 0。下面研究有、无 RAML 对系统的影响。

3.1 仿真测试系统

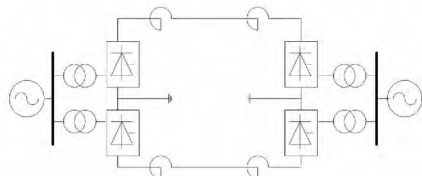
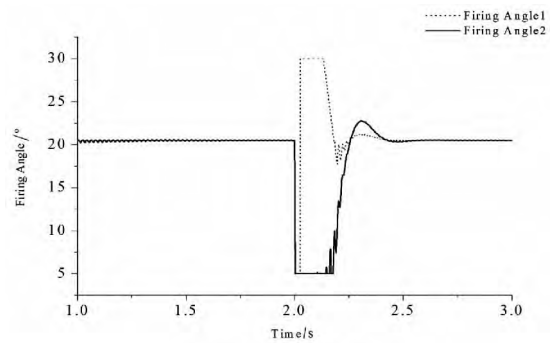


图2 RAML的存在对于直流系统影响的测试系统

建立如图2所示的额定直流电压为±800 kV, 额定电流为5 kA, 额定送电功率为8 000 MW的特高压直流输电系统。 $U_c \angle 0$ 为无穷大系统, 用此仿真系统来分析RAML的有、无对于直流系统的直流电压、直流电流和整流侧触发角的影响。

3.2 仿真实验结果

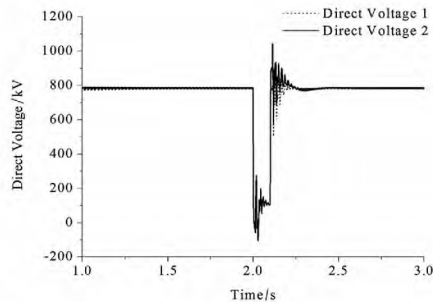
特高压直流输电工程双极±800 kV运行, 传输功率8 000 MW。设置 $t=2$ s时, 特高压直流系统整流侧交流母线出现金属性三相短路故障, 可以得到直流工程相关物理量的仿真结果如图3所示。图3中“1”代表有RAML元件, “2”表示无RAML元件。



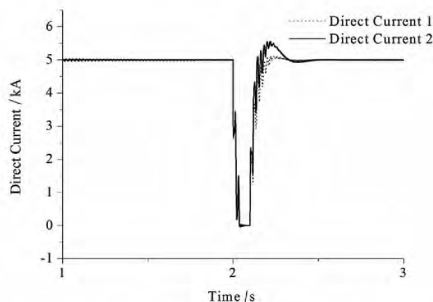
(d) 整流侧触发角

图3 RAML对直流系统影响的仿真结果

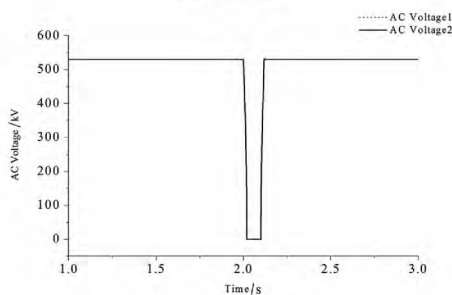
由图3可知, 整流侧交流母线电压恢复时, 由于有RAML元件时整流侧的触发角从 30° 减小, 其值大于无RAML元件的系统的整流侧触发角, 有RAML元件的系统整流侧直流电压小, 直流电流小。由于无RAML元件的系统直流电流上升过快, 其值迅速超过额定值, 通过系统的控制调节最终达到额定值, 其达到稳态值时间较长。



(a) 整流侧直流电压



(b) 直流电流



(c) 整流侧交流母线电压

4 RAML环节对交流系统的影响

4.1 机理分析

用电动势 \dot{E} 作为发电机等值电动势, 则电动势 \dot{E} 与无限大系统间的电抗为 x_I 。

正常运行时(I) 发电机的电磁功率可表达为

$$P_I = \frac{EU}{x_I} \sin\delta \quad (6)$$

故障运行时(II) 电动势 \dot{E} 与无限大系统间的电抗为 x_{II} , 发电机的电磁功率可表达为

$$P_{II} = \frac{EU}{x_{II}} \sin\delta \quad (7)$$

电抗有如下关系:

$$x_I < x_{II} \quad (8)$$

如图4所示为发电机在正常运行(I)、故障(II)两种状态下的功率特性曲线。

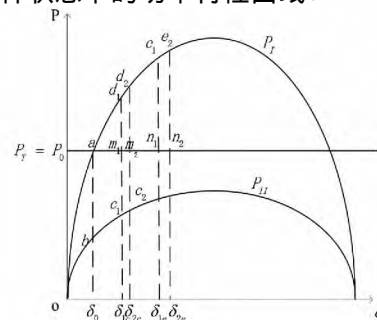


图4 仿真系统的正常运行和故障的功率特性曲线

1) 正常运行方式。如果发电机向系统输送的功率为 P_0 , 则原动机输出的机械功率 P_T 等于 P_0 (假设扰动后 P_T 保持不变) 图 4 中 a 为正常运行发电机的运行点, 此时的功角为 δ 。

2) 故障阶段。当整流侧交流母线发生三相短路故障时, 功率特性曲线由 P_I 立即降到 P_{II} , 但由于转子的惯性作用, 转子角度不会立即变化。因此, 发电机的运行点由 a 突然降至 b , 输出功率显著减少, 而 P_T 保持不变, 故产生较大的过剩功率。在过剩转矩的作用下发电机转子将加速, 其相对速度和相对角度 δ 逐渐增大, 使运行点由 b 到 c_1 移动; 由于含有 RAML 的控制系统中触发角较大, 其输出的直流电压和直流电流相比于无 RAML 的控制系统小, 传输的直流功率也小, 因此含有 RAML 的控制系统加速面积要大一些, 这在图 4 中表现为故障切除的时间相对于无 RAML 的控制系统要晚一些。图 4 中 $S_{abc_1m_1}$ 为不含有 RAML 控制系统的加速面积; $S_{abc_2m_2}$ 为含有 RAML 控制系统的加速面积。

3) 故障切除。含有 RAML 的控制系统在 δ_{2c} 切除故障, 无 RAML 的控制系统在 δ_{1c} 切除故障。在故障切除后, 发电机的运行点从 c_1 突然变至 d_1 , 此时发电机的输出功率比原动机的机械功率大, 使转子受到制动, 转子速度逐渐减慢。由于有 RAML 的控制系统加速面积要大一些, 并且切除时间和切除时的角度也更大一些, 要达到 e_2 , 因此其减速面积 $S_{d_2e_2n_2m_2}$ 更大一些, 而无 RAML 的控制系统只达到 e_1 , 其减速面积为 $S_{d_1e_1n_1m_1}$ 。振荡过程中总有能量损耗, 因而振荡是逐渐衰减的, 最后都能稳定运行到 a 。而无 RAML 的控制系统振荡时间短, 振荡幅度更小。

4.2 RAML 环节对交流系统的影响仿真分析

4.2.1 仿真测试系统

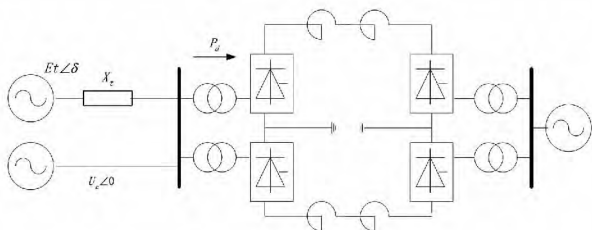


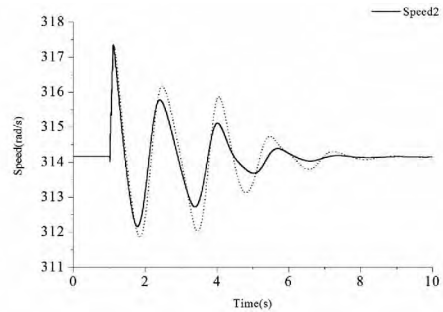
图5 RAML的存在对于交流系统影响的测试系统

建立如图 5 所示的额定直流电压为 ± 800 kV, 额定电流为 5 kA, 额定送电功率为 8 000 MW 的特高压直流输电系统。 $U_c \angle 0$ 为无穷大系统, $E_1 \angle \delta$ 为一台发电机 P_d 为传输的有功功率。用此仿真系统来分析 RAML 的有无对于发电机转速以及交流母

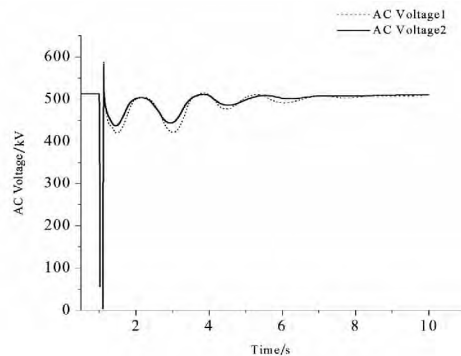
线电压的影响。

4.2.2 仿真实验结果

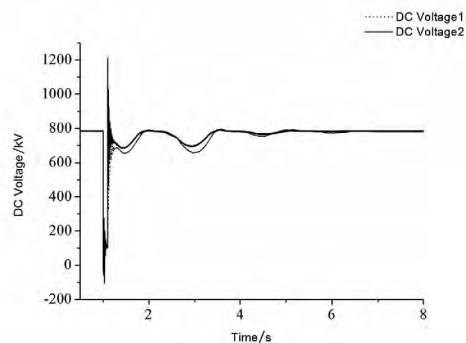
特高压直流输电工程双极 ± 800 kV 运行, 传输功率 8 000 MW。设置 $t = 2$ s 时, 特高压直流系统整流侧交流母线出现金属性三相短路故障, 可以得到直流工程相关物理量的仿真结果如图 6 所示。图 6 中“1”代表有 RAML 元件, “2”表示无 RAML 元件。



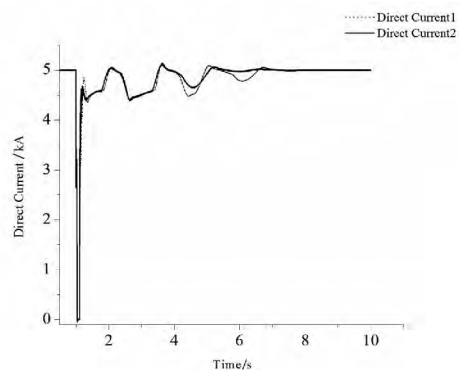
(a) 转速



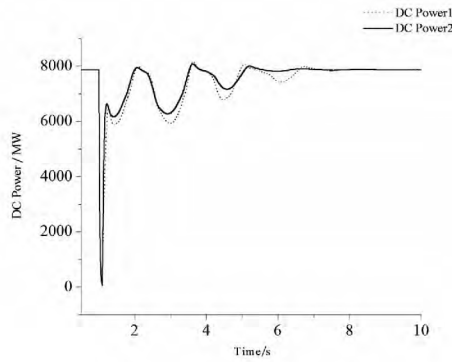
(b) 整流侧交流母线电压



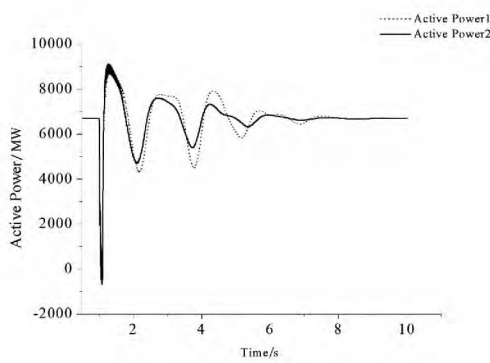
(c) 整流侧直流电压



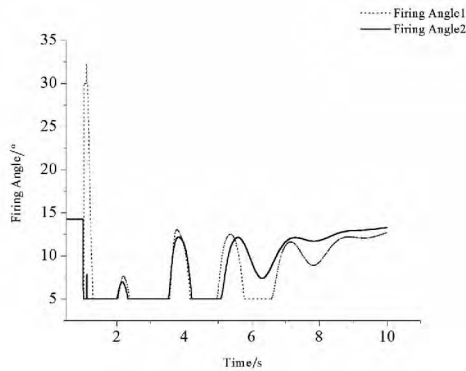
(d) 直流电流



(e) 传输功率



(f) 发电机输出功率



(g) 整流侧触发角

图6 RAML对交流系统影响的仿真结果

由图6可知,由于RAML环节限制了故障整流侧触发角的恢复,减缓了直流系统功率恢复,因此导致交流侧稳定性能降低,与机理分析结果一致。

5 结论

引入RAML的目的就是在整流侧交流故障消失,交流母线电压恢复正常时,能够防止直流系统中电流、电压上升过快,通过仿真证明这个目的能够达到,但效果不是很明显。RAML的存在对交流系统的稳定性会产生更大的影响,使发电机转速、发电机

的极端电压和发电机输出的有功功率变化更大,这些导致交流系统的稳定性变差。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 23 - 26.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 65 - 70.
- [3] 宋云亭, 郑超, 秦晓辉. 大电网结构规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 63 - 87.
- [4] 徐政. 交直流动态电力系统行为分[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 65 - 70.
- [5] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 93 - 121.
- [6] 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: 226 - 231.
- [7] 熊凌飞. HVDC换流阀触发控制模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [8] 谢俊君, 董曼玲, 何俊佳, 等. PLL动态性能对HVDC系统启动过程的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 385 - 390.
- [9] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流整流站动态无功特性解析及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4886 - 4896.
- [10] 郑超. 直流逆变站电压稳定测度指标及紧急控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 344 - 352.
- [11] 郑超, 马世英, 盛灿辉. 近振荡中心直流逆变站对系统阻尼的影响及优化措施[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4895 - 4905.
- [12] 汪娟娟, 张尧, 夏成军, 等. 交直流电力系统暂态电压稳定性综述[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 30 - 34.
- [13] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭. 交流系统接地故障对HVDC的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 144 - 149.
- [14] 李兴源, 邵震霞, 汤广福. 多馈入高压直流输电系统的分散协调控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 8 - 12.

作者简介:

金子开(1990), 硕士, 研究方向为特高压直流输电的运行与控制。

(收稿日期: 2016 - 10 - 08)