

DOI: 10.7667/PSPC170028

考虑 RAML 环节的特高压直流整流侧动态响应特性及其对送端交流电网稳定性影响

滕予非^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 井实^{2,3}, 史华勃¹, 严磊¹, 张宏图⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 电力系统广域测量与控制四川省重点实验室, 四川 成都 611731; 3. 电子科技大学, 四川 成都 611731; 4. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610000)

摘要: 计及整流侧最小触发角限制(RAML)环节的影响, 对特高压直流工程在整流侧交流故障情况下的控制行为及响应特性进行了分析。首先, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了与实际直流工程控保逻辑一致的直流输电模型, 基于该模型探讨了 RAML 控制环节在系统暂态过程中对直流送端响应特性的影响。分析结果表明, 当整流侧控制保护系统中配置了 RAML 环节, 在交流电压恢复期间, 直流电压和直流电流的超调现象被消除。然而, 由于 RAML 环节的作用系统直流电压、直流电流以及直流有功功率的恢复速度也相应变慢。同时, 换流器吸收的无功功率也会较无 RAML 环节时更多。其次, 基于 EEAC 理论, 分析了 RAML 环节的配置对送端交流电网功角稳定性的影响。最后四川电网算例表明了结论的有效性。

关键词: 特高压直流; RAML; 直流输电控制; 功角稳定; 整流器

Dynamic response characteristic of rectifier side of UHVDC considering RAML link and its influence on the power angle stability of sending side power grid

TENG Yufei^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, JING Shi^{2,3}, SHI Huabo¹, YAN Lei¹, ZHANG Hongtu⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 2. Power System Wide Area Measurement and Control of the Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611731, China; 3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: The control activities and response characteristics of UHVDC projects subjecting to AC system faults at the rectifier side are studied, considering the effect of Rectifier Alpha Minimum Limiter link (RAML). First, an HVDC system model which has the same control logic as that used in a real UHVDC system is built in PSCAD/EMTDC. Based on this model, the effect of RAML on the dynamic responses of the rectifier side during transient process of the system is investigated. The analysis results show that, with RAML, the overshoot of the DC voltage and DC current is avoided. However, the recovery speed of the DC voltage, DC current as well as the active power delivered by the HVDC link is slowed down. Furthermore, with RAML, the converters will consume more reactive power. Second, the effect of RAML on the angle stability of the AC system at the sending end is analyzed based on EEAC theory, and the analysis results are verified by simulations on Sichuan power system.

This work is supported by Sichuan Science & Technology Department Major Research Development Project (No. 2017GZ0054) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2015M582543).

Key words: UHVDC; RAML; control of HVDC; angle stability; rectifier

0 引言

特高压直流输电技术由于其工程造价低、有功损耗小、输送功率大等优点, 在远距离大容量输电,

电力系统异步联网等方面受到了高度重视^[1-3]。

然而, 随着特高压直流工程不断投运, 交直流耦合特性明显加强, 直流系统输送有功功率大、换流器无功消耗多等特点使得交直流混联电网的安全稳定分析变得更加复杂^[4]。文献[5]在深入研究特高压大电网特性的基础上, 阐明了当前电网正处于“强直弱交”过渡期这一基本属性, 概括了当前电网主

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2017GZ0054); 中国博士后科学基金资助项目(2015M582543)

要运行特点。文献[6]则通过理论分析深入研究了影响多馈入短路比变化的因素,分析了直流落点间的电气距离(互阻抗)、网络结构,包括网络拓扑、线路阻抗、电源分布等多馈入短路比的影响,给出了多馈入短路比的变化规律。

在对交直流电网运行特性进行分析的过程中,大量学者认识到直流输电的控制行为及其在电网扰动状况下的响应行为对电网的稳定有着重要的影响。如果在模型中简化,甚至忽略了低压限流控制(VDCOL)^[7]、锁相环(PLL)、换相失败预测以及整流侧最小触发角限制器(RAML)等控制环节,其造成的误差,甚至是错误的结果可能对交直流混联电网安全运行造成重大的隐患。分析表明,直流控制逻辑中,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均会对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产生显著的影响^[8]。而直流系统逆变侧的控制逻辑,也将决定逆变站在交流电压波动工况下综合动态功率特性,进而影响直流受端系统的电压稳定性^[9]和阻尼振荡特性^[10-11]。文献[12]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(CFC),提出了两种提高控制系统中锁相环 PLL 精度的方法。文献[13]则深入研究了锁相环(PLL)对 HVDC 系统启动过程的影响。同时,大量文献也报道了换相失败预测及抑制控制器的优化研究^[14-15]。

由此可见,随着仿真分析工作的不断深入,直流输电控制的模型不断精细化,各个控制环节对直流工程及电网的影响都得以深入的分析。然而,针对整流侧最小触发角限制(RAML)环节,分析其在扰动期间对高压直流输电系统整流侧动态响应特性的分析却未见报道。

在此背景下,本文在对 RAML 环节的结构和功能进行分析的基础上,针对直流—无穷大系统,利用电磁暂态分析方法探讨了 RAML 环节的特性与直流系统交流母线故障后故障过程的关系。其次,本文利用 EEAC 方法,分析了 RAML 环节对交直流系统安全稳定运行的影响。四川电网算例表明了分析结论的正确性。

1 RAML 环节原理及基本逻辑

当高压直流输电系统正常运行时,整流侧触发角通常运行在 15°左右。而当送端交流电网发生故障时,为了实现整流侧定电流控制,整流侧换流器的触发角 α 会快速降低至 5°左右。此时,一旦故障切除,整流侧交流电压得以快速恢复,较小的 α 值

会导致直流系统电压、电流出现明显的超调,甚至导致直流系统再次发生换相失败。

为了避免这一现象发生,ABB 等厂家在控制系统中引入整流站最小触发角 α 限制(RAML)环节。该功能一旦检测到送端交流电压降低,就会将 α 角最小限制值提升至 30°左右,缓解在交流电压恢复后出现的直流电压、电流超调现象。该功能将在交流故障消除后通过逐步降低触发角最小限制值的方式缓慢退出。

根据这一基本思想,高压直流工程控制保护系统中 RAML 逻辑实现方式如图 1 所示。

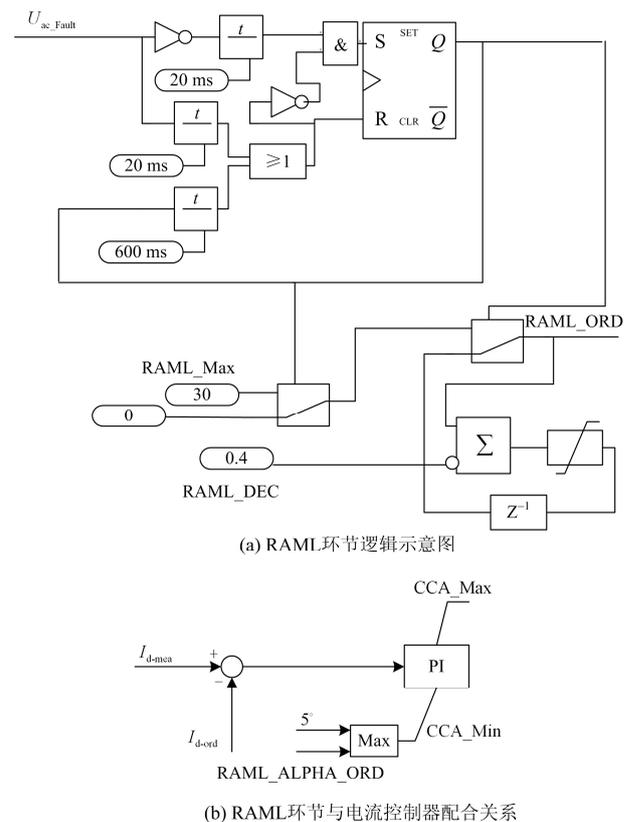


图 1 RAML 逻辑框图

Fig. 1 Logic structure of RAML

图 1 中, U_{ac_Fault} 是直流送端交流电网故障标志位,当整流侧交流系统由于故障等因素导致交流电压降低至整定值 U_{set} 以下时, U_{ac_Fault} 置为 1,反之则置为 0。RAML_ORD 是 RAML 环节的输出。 I_{d_mea} 与 I_{d_ord} 分别是直流电流的测量值和指令值。 CCA_Max 与 CCA_Min 则是电流 PI 控制环节的最大值和最小值, $RAML_Max$ 为 RAML 环节最大的输出角,图 1 中初设为 30°。 $RAML_DEC$ 是交流侧电压恢复后, $RAML_ORD$ 从 $RAML_Max$ 下降至 0

的速度。

由图 1 可知, RAML 环节的逻辑可简述如下。

1) 直流输电系统正常运行时, U_{ac_Fault} 复归为 0, 图 1 中 RS 触发器输出也为 0。此时, RAML 环节的输出 RAML_ORD 将固定为 0° 。由于 RAML_ORD 小于 5° , 因此直流工程定电流控制器 PI 环节的下限 CCA_Min 将设定为 5° 。

2) 当直流输电系统整流侧交流系统出现故障而导致电压降低至整定值 U_{set} 以下时, RAML 环节将延时 20 ms, 将 RS 触发器输出置为 1。此时, RAML 环节的输出 RAML_ORD 维持为 RAML_Max (如 30°)。

3) 当交流系统故障切除, 电压恢复至 U_{set} 以上时, RAML 环节将延时 20 ms, 使得 RS 触发器输出重置为 0。此时, RAML 环节的输出会以 RAML_DEC (如 $0.4^\circ/2\text{ms}$) 的速度, 由 RAML_Max 下降至 0。

2 RAML 环节对整流侧响应特性影响分析

2.1 测试系统模型

为了分析计及 RAML 环节的特高压直流整流侧动态功率特性, 在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中, 建立如图 2 所示的特高压直流输电系统。该系统额定电压为 $\pm 800\text{ kV}$ 、额定电流为 5 kA , 因此双极额定功率达到 8000 MW 。

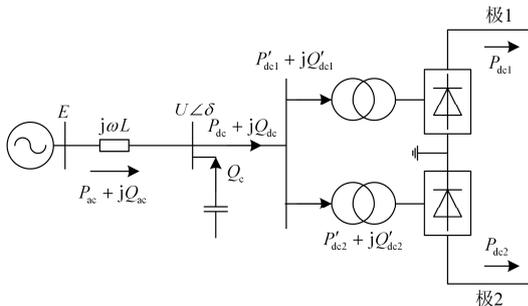


图 2 测试系统

Fig. 2 Testing system

图 2 中 E 为交流系统的等值内电势, $j\omega L$ 为交流系统等值阻抗, $U_{ac} \angle \delta$ 为直流换流站交流母线的电压与相角, P_{dc1} 、 P_{dc2} 分别为直流输电系统极 1、极 2 的传输有功, $P'_{dc1} + jQ'_{dc1}$ 、 $P'_{dc2} + jQ'_{dc2}$ 、 $P_{dc} + jQ_{dc}$ 分别为直流输电系统极 1、极 2 以及双极从交流电网吸收的有功与无功, Q_c 为换流站高压滤波器与无功补偿装置提供的无功, $P_{ac} + jQ_{ac}$ 则为交流系统注入换流站的有功与无功。

图 2 中特高压直流输电系统采用与现场一致的

控保逻辑, 在正常运行时整流站处于定电流控制模式, 而逆变侧处于定熄弧角 (AMAX) 控制模式。稳态运行条件下, 滤波器提供的无功量 Q_c 基本可以补偿换流器无功消耗 Q_{dc} 。系统基准容量 S_B 取为 100 MVA 。

为了分析整流侧交流系统电压波动对整流站动态功率的影响, 可设置交流电网等值电动势 E 按式(1)所示关系变化。

$$E = E_{t0} - \Delta E_t \sin(2\pi f_s t) \quad (1)$$

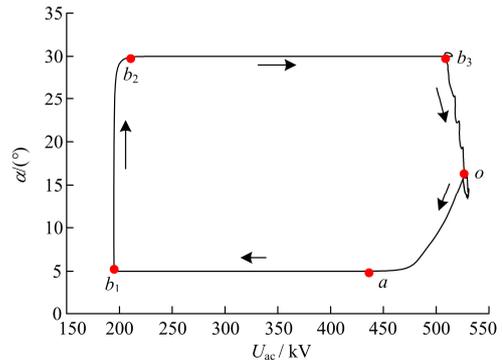
式中: E_{t0} 为交流电网等值电动势初值; 而 ΔE_t 和 f_s 分别为电动势跌落的深度与变化频率。

2.2 送端交流电压跌落及恢复时直流系统响应特性

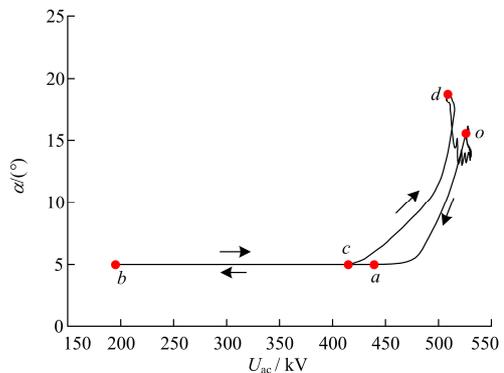
当直流近区交流母线出现短路故障时, 随着故障的发生及清除, 换流站交流母线电压将出现快速的跌落及恢复。为了描述该过程, 可设置如下所述的情景。

在式(1)中, 设置 ΔE_t 为 0.65 p.u. , f_s 为 8 Hz 。在 RAML 环节方面, 设置 RAML 投入的整定值 $U_{set} = 0.75\text{ p.u.}$ 、 $\text{RAML_Max} = 30^\circ$ 。在上述设置下, 分别考虑控保系统中配置 RAML 环节与不配置 RAML 环节两种工况, 对高压直流系统的动态响应特性进行分析。

对应整流侧交流母线 U_{ac} 的变化, 以上两种工况下, 两侧换流器触发角以及直流电压、直流电流的变化情况分别如图 3 所示。



(a) 计及 RAML 环节工况下 $\alpha-U_{ac}$ 轨迹



(b) 不计及 RAML 环节工况下 $\alpha-U_{ac}$ 轨迹

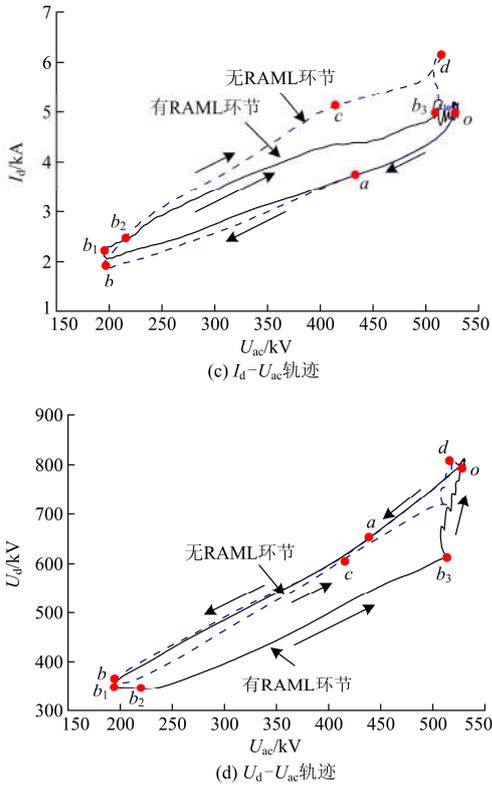


图 3 电压快速变化时整流侧电气量轨迹图

Fig. 3 Trajectory chart of electrical variables of rectifier side when AC voltage varies rapidly

由图 3(a)、(c)、(d)可知，当特高压直流整流侧控制系统中设置了 RAML 环节时，若交流母线电压快速变化，其主要特征解析如下所述。

1) U_{ac} 初始跌落的 oa 阶段。整流器维持定功率控制，触发角 α 随着交流电压降低而迅速降低。但是由于交流电压降落速度过快，超过了控制系统的反应时间，因此直流电压与直流电流依然出现降低。当直流电流降低至 0.9 p.u.时，逆变器侧从定熄弧角控制转换到定 I_d 电流控制。

2) U_{ac} 深度跌落的 $a-b_1-b_2$ 阶段。整流侧触发角将降至最小触发角 α_{min} (一般为 5°)，为保证换流阀可靠触发，整流器将切换至 α_{min} 控制，对应逆变器则运行在定 I_d 控制方式下。在此过程中，由于 VDCOL 环节的作用，直流电流指令也会随之下降。因此在 $a-b_1$ 阶段中直流电压及直流电流依然呈现双降的情况。而当交流侧电压降低至 RAML 环节的电压整定值后，经过 20 ms 延时，RAML 环节开始发挥作用。此时，整流侧最小触发角将提升并维持在 30° ，如图 3 中所示的 b_1-b_2 阶段。

3) U_{ac} 初始恢复的 b_2-b_3 阶段。在此过程中，由于交流电压依然低于整定值，因此整流侧触发角依

然维持在 30° ，而逆变器则维持在定 I_d 控制方式。因此直流电压、VDCOL 输出电流指令以及实际直流电流将随着交流电压的恢复同时增加。

4) U_{ac} 显著回升的 b_3-o 阶段。在该阶段中，随着交流电压恢复至 RAML 环节的电压整定值以上，RAML 环节限制的最小触发角以一定速度减小至 α_{min} 。同时，整流侧定电流逐渐发挥作用，而逆变器控制方式也将由定 I_d 控制转变为定熄弧角控制。因此，随着触发角降低，系统直流电压与直流电流将逐渐恢复为正常电压电流，直流工程恢复正常运行。

通过以上分析，RAML 环节使得直流系统整流侧触发角在交流侧电压显著降低时，将整流侧触发角由 α_{min} 提升至 30° 。图 3(c)、3(d)可知，这一举措使得交流电压恢复期间直流电压的恢复速度明显降低，同时也使得直流电流的过冲现象有明显缓解。由此可见，这一环节对于交流电压恢复期间，直流功率的动态特性有着显著的影响。

图 4 所示是对应整流侧交流母线 U_{ac} 的变化，整流侧有功及整流站与交流系统无功交换情况的变化轨迹。

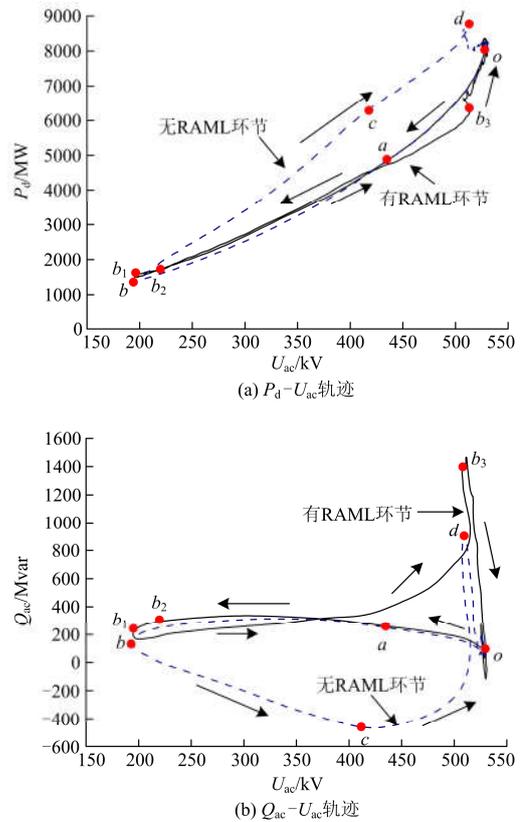


图 4 电压快速变化时整流侧功率轨迹图

Fig. 4 Trajectory chart of active power and reactive power of rectifier side when AC voltage varies rapidly

由图 4 可知, 当整流侧配置了 RAML 环节后, 在交流电压恢复期间, 由于直流电流恢复速度变慢, 因此直流有功功率的恢复速度也相应变慢。同时, 由于较大的触发角降低了换流器的功率因数, 电压恢复期间换流器吸收的无功功率也会较无 RAML 环节时更多。

2.3 影响因素分析

2.3.1 RAML_Max 对动态响应特性影响

保持其他因素不变, 分别设置交流电压降落后 RAML 输出角度最大值(RAML_Max)为 10° 、 20° 、 30° 、 40° , 由此可以得到交流电压扰动期间, 直流系统动态响应轨迹如图 5 所示。

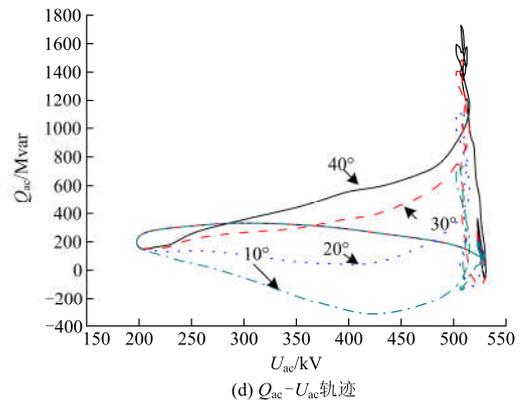
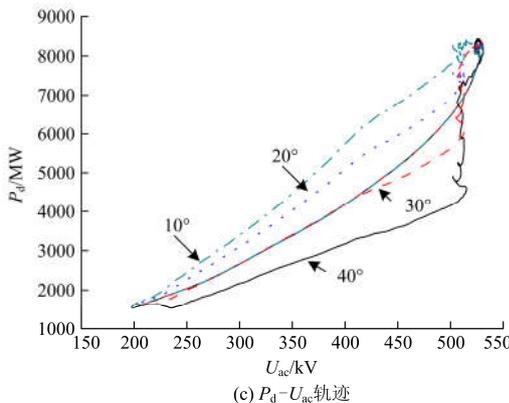
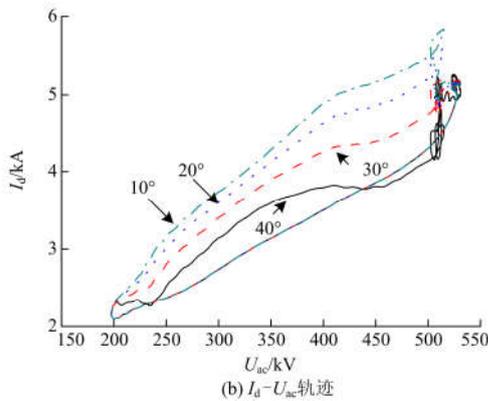
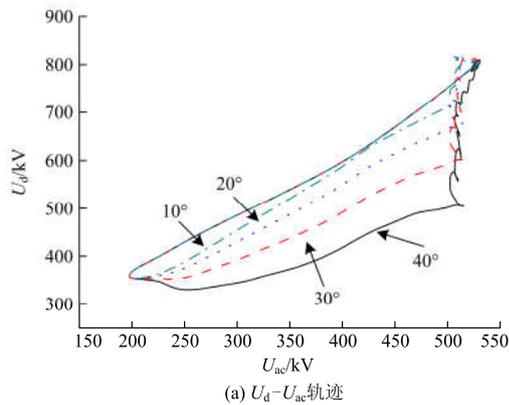


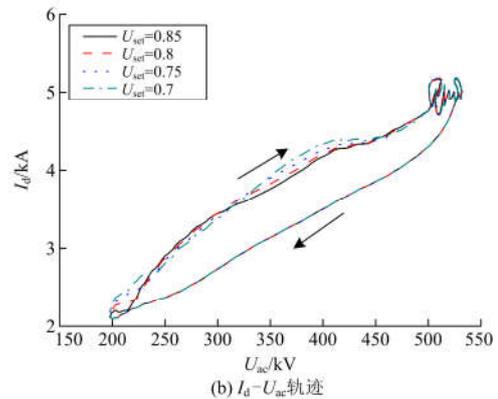
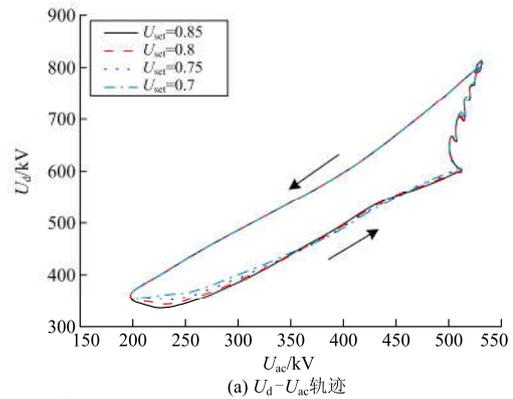
图 5 RAML_Max 不同时整流侧功率轨迹图

Fig. 5 Trajectory chart of rectifier side power with different RAML_Max

由图 5 可知, 随着 RAML_Max 的增加, 增大了交流电压恢复期间的整流侧换流器触发角, 因此导致直流电流与有功功率恢复速度进一步降低, 同时电压恢复期间换流器吸收的无功功率也会随着功率因数的降低而增加。

2.3.2 U_{set} 对动态响应特性影响

保持其他因素不变, 分别设置交流电压降落后 RAML 环节启动的电压定值(U_{set})为 0.7 p.u.、0.75 p.u.、0.8 p.u.、0.85 p.u., 由此可以得到交流电压扰动期间, 整流侧系统电气量的扰动轨迹如图 6 所示。



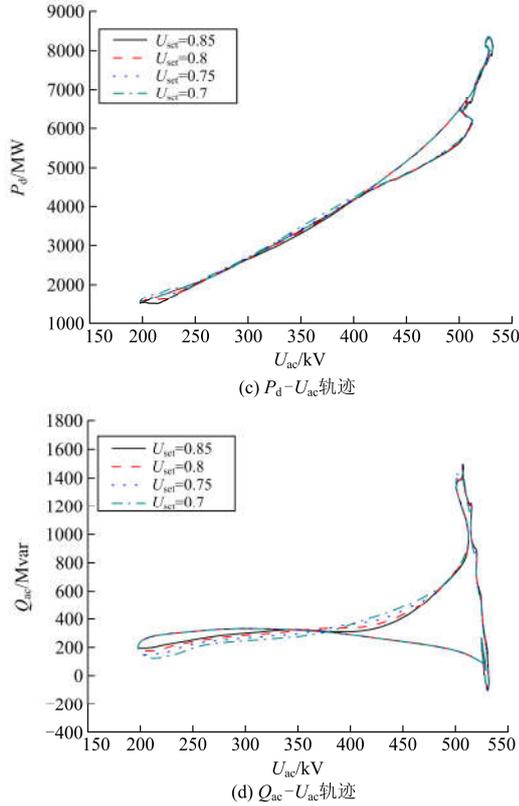


图 6 不同 U_{set} 情况下时整流侧功率轨迹图

Fig. 6 Trajectory chart of rectifier side power with different U_{set}

由图 6 可知, 随着 U_{set} 的上升, 增加了 RAML 环节作用的时间, 导致直流电压与直流电流恢复速度进一步降低, 以及电压恢复期间换流器吸收的无功功率也会随着功率因数的降低而增加。但仿真结果也表明, U_{set} 的取值在 0.7~0.85 p.u. 变化时, 对整流侧系统电气量的动态特性影响不大。

3 RAML 环节对送端电网功角稳定性影响

利用 EEAC 的思想, 分析 RAML 环节对送端交直流系统稳定性影响。

根据该理论, 可将双机失稳模式系统等效为单机无穷大模型如式(2)所示。

$$M\ddot{\delta} = P_m - P_C - P_{max} \sin(\delta - \gamma) \quad (2)$$

式中:

$$P_C = \frac{M_A}{M_A + M_S} \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} E_i E_k G_{ik} - \frac{M_S}{M_A + M_S} \sum_{j \in A} \sum_{l \in A} E_j E_l G_{jl}$$

$$P_{max} = \sqrt{\left(\sum_{i \in S} \sum_{l \in A} E_i E_l B_{il} \right)^2 + \left(\frac{M_A - M_S}{M_A + M_S} \sum_{i \in S} \sum_{l \in A} E_i E_l G_{il} \right)^2}$$

$$\gamma = -\arctan \left[\frac{\left(\frac{M_A - M_S}{M_A + M_S} \sum_{i \in S} \sum_{l \in A} E_i E_l G_{il} \right)}{\left(\sum_{i \in S} \sum_{l \in A} E_i E_l B_{il} \right)} \right]$$

在计及直流工程的影响后, 需要对 P_C 表达式进

行修正, 得到

$$P_C = \frac{M_A}{M_A + M_S} \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} E_i E_k G_{ik} - \frac{M_S}{M_A + M_S} \sum_{j \in A} \sum_{l \in A} E_j E_l G_{jl} + \frac{M_A}{M_A + M_S} \sum_{k \in S} \frac{k_k P_R E_k}{U_R} \quad (3)$$

式中: k_k 为把直流节点的注入电流移置到 k 号发电机内节点上修正的负荷移置系数; E_i 为 i 号发电机的电动势; U_R 为节点电压。

利用上述理论, 可以定性分析 RAML 环节对送端交直流系统稳定性的影响。需要说明的是, 由于 RAML 环节作用时间往往仅在故障消除后 200 ms 以内, 此时发电机仍处于加速阶段, 因此以下仅对系统正摆稳定性进行分析。

设置直流送端换流站交流母线出现三相金属性短路故障, 在此工况下可以得到正摆阶段功角关系示意图如图 7 所示。

由图 7 可知, 送端交直流系统正常运行时, S 机群、 A 机群间的功角差稳定保持在 δ_1 。而当换流站交流母线出现短路故障时, 一方面系统功角特性 P_{max} 大幅下降, 另一方面根据式(2)可知, 由于直流外送功率降低为 0, $P_m - P_C$ 大幅提升, 因此系统进入加速状态, 加速面积为 S_1 (对应图 7 中左斜线阴影区域)。当换流站交流母线短路故障消失, 电压恢复后, 直流功率逐步由 0 恢复至正常值。由之前分析可知, 当直流控制保护系统配置了 RAML 环节后, 直流功率恢复期间过调量较小, 同时恢复速度较未配置 RAML 时有所降低。因此, 图 7 中在未配置 RAML 环节工况下, 减速面积为 $S_2 + S_3$ (其中 S_2 对应图 7 中右斜线阴影区域, S_3 对应图 7 中交叉线阴影区域), 而配置了 RAML 环节工况下, 减速面积也将减少为 S_2 。

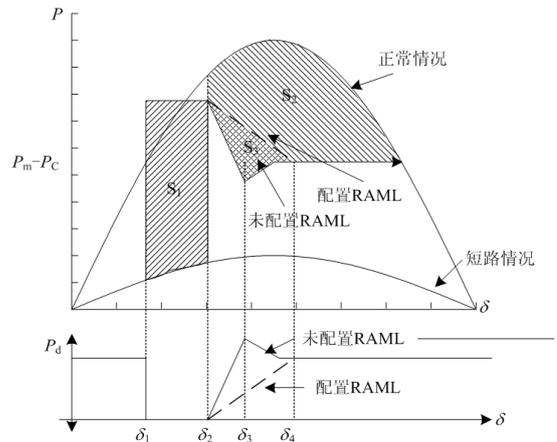


图 7 送端电网功角关系图

Fig. 7 Power-angle relationship of sending grid

根据稳定度的定义, 未配置 RAML 环节工况下, 系统稳定度为

$$\Delta V_{\text{noRAML}} = \frac{S_2 + S_3 - S_1}{S_1} \quad (4)$$

而配置 RAML 环节工况下, 系统稳定度为

$$\Delta V_{\text{RAML}} = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \quad (5)$$

由于 $\Delta V_{\text{noRAML}} > \Delta V_{\text{RAML}}$, 因此可见 RAML 环节的引入将降低送端交直流系统的稳定性能。

4 算例分析

四川电网是全国最大的清洁能源(水电能源)基地。截至 2015 年底, 省内调度总装机容量接近 8500 万 kW, 其中水电超过了 81%。大量电厂投入后, 四川省内发电机组装机容量已接近省内最大网供负荷的 2.8 倍, 大量功率则需要外送至华中、华东等负荷中心。目前, 四川电网已投运了 ± 500 kV 德宝、 ± 800 kV 复奉、锦苏以及宾金四条超特高压直流输电工程, 直流外送能力达到 2460 万 kW, 达到电网总外送能力的 85% 以上, 强直弱交特性十分明显。

本节以 ± 800 kV/7200 MW 锦苏特高压直流送端交流母线故障为例, 分析 RAML 控制环节不同参数下近区机组故障后机电响应, 用以探讨其对电网稳定性能的影响。

在丰大运行方式下, 近区锦东、锦西、官地等配套电源满发, 锦苏特高压直流额定功率运行。在此工况下, 设置如下故障:

- 1) $t=1.0$ s 时, 500 kV 锦东—锦屏线路锦东侧发生三相故障故障;
- 2) $t=1.09$ s 时, 故障线路锦东侧跳开;
- 3) $t=1.10$ s 时, 故障线路锦屏侧跳开, 故障清除。

在上述故障场景中, 分别考虑未配置 RAML、RAML_Max = 10°、20°、30°以及 40°等五种工况, 利用 PSASP 综合稳定程序, 得到锦东—三峡机组功角差仿真结果如图 8 所示。

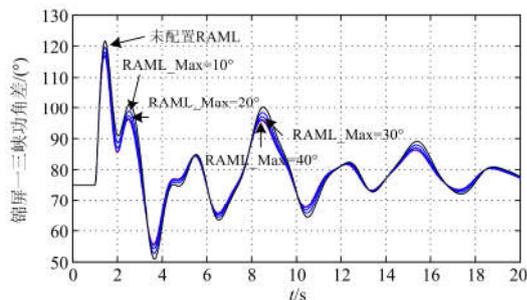


图 8 锦东—三峡功角差仿真结果

Fig. 8 Simulation results of power angle differential between Jindong and Sanxia

同时表 1 给出了不同工况下的最大功角差。

表 1 不同工况下最大功角差

Table 1 Max power angle differential in different simulation	
工况	最大功角差/(°)
无 RAML	41.83
RAML_Max=10°	42.14
RAML_Max=20°	43.223
RAML_Max=30°	44.77
RAML_Max=40°	46.75

由图 8 和表 1 可知, 与未配置 RAML 环节相比, 配置 RAML 环节后, 相同故障下机组的摇摆将有所加剧, 且 RAML_Max 值越大, 摇摆曲线越剧烈。这与前文得到的结论相符, 引入 RAML 环节将降低送端电网的稳定性。但同时可以看出, 当送端电网较为坚强时, 这种稳定性能的下降是可以接受的。

5 结论

本文针对整流侧最小触发角限制(RAML)环节, 对其在扰动期间对特高压直流整流侧响应特性及其对交流电网稳定性影响进行了分析, 得到如下结论:

1) RAML 环节使得直流系统整流侧触发角在交流侧电压显著降低时, 将整流侧触发角由 α_{\min} 提升至 30°。这一环节使得在故障后交流电压恢复期间, 直流电压、直流电流的恢复速度明显降低, 同时也使得直流电流的过冲现象有明显缓解。

2) 当整流侧控制保护系统中配置 RAML 环节时, 在交流电压恢复期间, 直流有功功率的恢复速度相应变慢, 电压恢复期间换流器吸收的无功功率也会较无 RAML 环节时更多。在此工况下, 并配置 RAML 环节, 系统的稳定性能较未配置前有所下降, 但当送端电网较为坚强时, 这种稳定性能的下降是可以接受的。

3) 整流站动态功率轨迹与其控制系统相关设置密切相关, 若 RAML 环节输出最大值 RAML_Max 增加, 电压恢复期间有功功率恢复速度将进一步降低, 而换流器吸收的无功功率则会进一步增加, 送端交直流系统的稳定性能也随之下降。

参考文献

- [1] 岳亚菲, 胡欢, 沈开奎, 等. 高压直流输电控制保护系统测控装置联锁图形化二次编程功能研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 123-129.

YUE Yafei, HU Huan, SHEN Kaikui, et al. Research on interlock schematic second programmable function in measurement & control device of control and protection system for HVDC[J]. Power System Protection and

- Control, 2016, 44(24): 123-129.
- [2] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 直流参与稳定控制的典型场景及技术需求[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3750-3759.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. A survey on typical scenarios and technology needs for HVDC participated into stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3750-3759.
- [3] 饶宏, 张东辉, 赵晓斌, 等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2481-2488.
RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, et al. Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.
- [4] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [5] 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.
- [6] 林伟芳, 汤涌, 郭小江. 多馈入交直流系统短路比影响因素分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 64-68.
LIN Weifang, TANG Yong, GUO Xiaojiang. Analysis of influencing factors of short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 64-68.
- [7] 刘磊, 王渝红, 李兴源, 等. 基于模糊控制的变斜率VDCOL控制器设计[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1814-1818.
LIU Lei, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1814-1818.
- [8] 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.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. Study on the dynamic reactive power characteristic of HVDC rectifier stations and optimization measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4886-4896.
- [9] 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.
ZHENG Chao. Voltage stability index of HVDC inverter station and emergency control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 344-352.
- [10] 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.
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHENG Canhui. Study on the influence of inverter station adjacent to the oscillation center on power system damping characteristic and optimization measures[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4895-4905.
- [11] BAI Feifei, LIU Yong, LIU Yilu, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.
- [12] 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.
XIONG Lingfei. Research on modeling of HVDC converter firing control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [13] 谢施君, 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.
XIE Shijun, DONG Manling, HE Junjia, et al. Influence of dynamic performance of phase lock loop on the starting process for HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 385-390.
- [14] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.
- [15] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-131.
WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 124-131.

收稿日期: 2017-01-05; 修回日期: 2017-03-31

作者简介:

滕予非(1984—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为特高压交直流电网分析与控制。E-mail: yfteng2011@163.com

(编辑 姜新丽)