

柔性直流输电系统孤岛运行方式下的故障电流抑制方法

王 庆¹, 卢 宇², 胡兆庆², 王 柯², 李海英², 刘海彬^{2,3}

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211102;

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

摘要: 结合实际工程需要, 针对柔性直流输电系统运行在孤岛状态下发生交流侧故障后容易引起过流跳闸的问题, 提出一种柔性直流输电系统在孤岛运行方式下的故障电流抑制和启动控制方法。该方法满足柔性直流孤岛运行方式下各类故障的电流抑制要求, 并且可以做到在柔性直流设备自身能力范围内, 向交流系统提供预先设定的故障电流, 同时可以实现正常升压启动。结合基于控制保护样机和 RTLAB 构成的闭环实时仿真系统, 对提出的方案进行了验证。结果表明, 与常规的幅频开环孤岛控制及电流环控制策略相比, 所提方案提高了故障穿越能力, 且启动策略实现了孤岛运行模式下的无冲击顺利启动。

关键词: 柔性直流输电; 孤岛; 故障穿越; 启动控制

0 引言

柔性直流输电技术因其灵活的控制调节能力, 近年来受到了国内外学术界和工程界广泛的关注和研究。截至 2016 年, 中国已经建成了上海南汇柔性直流工程、南澳三端柔性直流工程、舟山五端柔性直流工程、厦门对称双极柔性直流工程和罗平背靠背柔性直流工程^[1-4]。

柔性直流输电系统无功控制模式包括交流电压控制和无功功率控制^[5-7], 有功控制模式包括有功功率控制、频率控制及定直流电压控制^[8]。但当柔性直流输电系统从交直流并列运行转为孤岛或者与较弱系统连接运行时, 如果采用上述常规控制方式, 存在控制系统稳定性和动态性能差的缺点^[9-11], 所以孤岛系统的交流侧频率必须依靠柔性直流来维持。柔性直流输电采用交流电压和频率的控制方式, 这种控制方式往往是开环控制方式, 在孤岛运行方式下发生交流系统故障时, 柔性直流换流站由于过流导致跳闸^[12]。可见, 有必要研究柔性直流输电系统在孤岛运行方式下的闭环控制。

目前闭环控制设计方式分为以下几种: 幅相控制、直接电压控制、直接电流控制和非线性控制^[13]等。幅相控制器是满足孤岛稳态运行的一种控制方式^[14], 文献[15-18]设计了电压源换流器型高压直

流(VSC-HVDC)向无源网络供电的直接电压控制器, 但不具备交流故障穿越能力。文献[19]研究了孤岛运行情况下与联网状态运行的相互转换方法, 特点是模块化多电平换流器(MMC)在联网状态和孤岛状态间转换时无需切换控制器, 转换过程中系统的响应特性较为平滑, 缺点是 MMC 联网时无法精准控制有功和无功功率, 并且由于使用了有功-频率下垂控制, 向无源孤岛供电时, 网侧交流电压频率会随孤岛负荷的波动而波动。文献[20-22]设计了向无源网络供电的类似有源控制下的双环控制器, 该控制器设计虽然考虑了较快的电流响应速度及稳态电流控制, 适合于稳态运行, 但实际存在故障后电压降低短时间内电流瞬间升高导致过流跳闸的缺点。文献[23-25]采用在换流站出口处装配无功补偿设备的方法, 用于提高故障时交流母线的电压支撑能力, 但缺点是需要增加额外设备。

本文针对无源孤岛方式下交流故障导致换流器过流跳闸的缺陷, 提出一种柔性直流输电系统在孤岛运行方式下的故障电流抑制和启动控制方法, 实现了孤岛运行下各类故障的穿越要求及孤岛方式下的正常升压启动。采用实际舟山工程五端控制保护样机和 RTLAB 数字仿真模型, 证实了所述方案的可行性和有效性。

1 柔性直流控制策略

无论是基于两电平、三电平拓扑结构, 还是基于模块化多电平拓扑结构的柔性直流输电系统, 其基

收稿日期: 2017-06-17; 修回日期: 2017-12-29。

上网日期: 2018-02-06。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900602)。

本控制策略都可采用基于直接电流控制的矢量控制方法^[26]。矢量控制方法中的内环电流控制实现了电流的快速控制,能够保证在联网方式下的交流系统故障成功穿越。但当交流电网为无源网络时,需要直接给定矢量变换的电压同步相位,由换流器来控制恒定频率及交流侧阀侧电压恒定,在这种控制方式下发生交流故障易导致过流跳闸^[12]。

以舟山五端柔性直流工程为例,舟山群岛包含了五个较大的主要海岛:舟山岛、岱山岛、衢山岛、嵎礁岛、洋山岛,其电网是一个典型的海岛电网。舟山五端柔性直流输电工程实现五个海岛间交直流输电互联,但洋山岛与外界连接薄弱,仅通过 110 kV 交流线路连接到岱山岛,电网结构如附录 A 图 A1 所示,一旦该线路发生交流故障,洋山岛立即转为孤岛运行^[27]。

舟山柔性直流工程设计了联网孤岛转换方式,在交流系统由于故障断线的情况下顺利接管了各相关岛屿的负荷,保证了供电的可靠性,但该功能尚无法在孤岛状态下再次承受交流系统短路故障。如附录 A 图 A1 所示,当洋山岛转为孤岛运行方式后,由于没有电压稳定的交流系统作为定向选择,坐标变换的电压角度直接由恒定频率值给定^[28],克服了文献^[19]中 MMC 联网运行时无法精准控制有功和无功功率,以及向无源孤岛供电时交流电压频率会随孤岛负荷波动的缺点。为实现定频率控制,另外增加了故障高频分量提取环节,避免了故障电压下误转孤岛的可能。在非孤岛运行情况下,为在网侧故障不平衡条件下获取准确的正负序电压相位信息,采用正负序分离相位锁定方式,并且结合频率微增量的切换逻辑,用于连接有源电网运行切换到孤岛运行时相位平滑切换到孤岛运行模式,如图 1 所示。图中: ω 为角频率; θ 为角度; k_1 为正弦函数和余弦函数的比例系数; K_p 和 K_i 分别为比例-积分(PI)环节的比例和积分系数; u_a^+ 和 u_β^+ 为交流网侧电压在静止坐标系下的正序分量; u_q 为电压 q 轴分量。

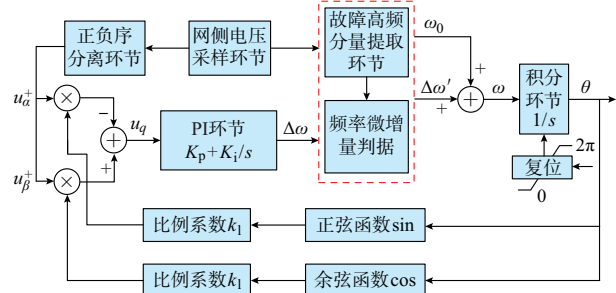


图 1 交流负荷侧变流器 L-VSC 的相位控制策略

Fig.1 Phase control strategy for AC load side converter L-VSC

图 1 中的频率微增量判据为:

$$|\Delta\omega| > \Delta_1 \quad (1)$$

$$\left| \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \right| > \Delta_2 \quad (2)$$

$$\Delta\omega' = f(\Delta\omega) \quad (3)$$

式中: Δ_1 和 Δ_2 为微增量判据门槛值,可根据实际取值; $\Delta\omega$ 为角频率变化量; $f(\Delta\omega)$ 为角速率偏差函数。

采用以上判据可以在有源电网运行切换到孤岛运行相位突变时,根据 $\Delta\omega$ 变化大小决定实际输出。当 $\Delta\omega$ 发生急剧变化后,该函数按照一定速率缓降至 0,可以保证切换平滑性。图 1 中:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (4)$$

式中: f_0 为频率额定值。

在孤岛方式下,交流负荷是经 DC/AC 变流器 L-VSC 并入直流网络,结构如附录 A 图 A2 所示。数学模型的推导过程如下,其在 dq 坐标系下的电压方程为^[29]:

$$u_{cd} = U_{Ld} - R_L i_{Ld} + \omega L i_{Lq} \quad (5)$$

$$u_{cq} = U_{Lq} - R_L i_{Lq} - \omega L i_{Ld} \quad (6)$$

式中: U_{Ld} 和 U_{Lq} 分别为网侧电压的 dq 轴分量; u_{cd} 和 u_{cq} 分别为控制输出电压的 dq 轴分量; R_L 和 L 分别为等效电阻和电感; i_{Ld} 和 i_{Lq} 分别为电流实测值的 dq 轴分量。

2 故障电流抑制策略

本文是以交流侧电压为控制目标,兼顾考虑故障穿越功能对故障电流进行限制,不同于常规孤岛运行下的电压-频率控制^[20-22],在电压外环基础上叠加了内环电流控制^[30]及电流指令限制功能^[3],如图 2 所示。图中: U_{Ld}^* 和 U_{Lq}^* 分别为网侧电压 dq 轴分量指令值; i_{Ld}^* 和 i_{Lq}^* 分别为 dq 轴电流指令值。

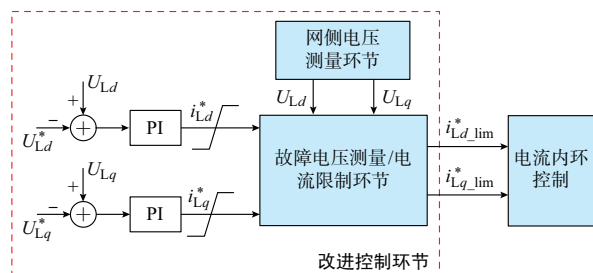


图 2 改进控制方案

Fig.2 Improved control scheme

改进控制环节输出电流限制指令 $i_{Ld_lim}^*$ 和 $i_{Lq_lim}^*$ 与 I_{max} 关系如下:

$$\sqrt{i_{Ld_lim}^{*2} + i_{Lq_lim}^{*2}} = I_{max} \quad (7)$$

I_{max} 为测量电压的线性分段组合方程,可以表示为:

$$I_{\max} = \begin{cases} f_1(U_{Ld}, U_{Lq}) & |U_{Ld}| \leq U_{\text{set1}}, |U_{Lq}| \leq U_{\text{set2}} \\ f_2(U_{Ld}, U_{Lq}) & |U_{Ld}| > U_{\text{set1}}, |U_{Lq}| \leq U_{\text{set2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： U_{Ld} 和 U_{Lq} 分别为测量网侧交流电压的 dq 轴分量； f_1 和 f_2 为电压 U_{Ld} 和 U_{Lq} 的线性组合表达式； U_{set1} 和 U_{set2} 为根据实际确定的门槛数值。

图2中直接指定 U_{Ld}^* 为1(标么值)， U_{Lq}^* 为0，可以避免在重负荷下网侧交流电压低的缺点，能够始终保持输出网侧电压为额定数值。

最终控制输出参考电压表达式如下^[30]：

$$u_{cd}^* = U_{Ld} + \omega L i_{Lq} - \left(k_{pd} + \frac{k_{id}}{s} \right) (i_{Ld_lim}^* - i_{Ld}) \quad (9)$$

$$u_{cq}^* = U_{Lq} - \omega L i_{Ld} - \left(k_{pq} + \frac{k_{iq}}{s} \right) (i_{Lq_lim}^* - i_{Lq}) \quad (10)$$

式中： $k_{pd} + k_{id}/s$ 为 d 轴调节比例-积分环节， k_{pd} 和 k_{id} 分别为其比例环节系数和积分环节系数； $k_{pq} + k_{iq}/s$ 为 q 轴调节比例-积分环节， k_{pq} 和 k_{iq} 分别为其比例环节系数和积分环节系数； u_{cd}^* 和 u_{cq}^* 分别为控制输出参考电压的 dq 分量。

3 闭环控制仿真验证

根据舟山五端柔性直流工程参数，搭建了基于控制保护样机的RTLAB实时仿真系统。采用两台RTLAB的主机模拟舟山定海、岱山、衢山、洋山、泗礁等五站的交流网络和直流网络，包括舟山本岛的交流220 kV线路、主要的110 kV线路和直流线路，另外五台OP7020负责模拟五站的柔性直流换流阀，实现换流阀子模块微秒级控制。仿真系统如附录A图A3所示。

控制保护样机包括交流站控、直流控制保护、阀控和I/O装置，其中阀控通过千兆以太网和RTLAB通信，负责下发子模块导通个数和解闭锁命令，以及换流阀子模块电压、故障个数等信息交互；I/O装置通过硬接线和RTLAB通信，负责交直流场电压互感器(TV)、电流互感器(TA)信息采集和开关刀闸的状态，以及分合命令等信息交互。控制保护闭环仿真系统如附录A图A4所示^[6]。利用上述仿真平台，模拟孤岛运行方式下的交流系统故障，对孤岛运行方式下采用改进闭环电流控制环节后的控制效果进行仿真验证。

3.1 孤岛闭环控制下的单相故障

附录A图A5中首先给出没有采用图2所示改

进控制环节时的结果。初始条件为：柔性直流侧送出有功功率30 MW，发出无功功率4.5 Mvar，额定容量100 MW。

单相故障下，网侧电流A相电流增大，其他两相变化不大，电流指令没有达到限制数值。由于功率保持正常输送，直流电压变化不大，其故障恢复后在直流电压控制站调节作用下，有一个直流电压正常调节至初始电压过程，超调最大在0.95%。不采用改进控制环节且发生交流单相故障时，网侧电流达到过负荷水平，而采用了改进电流闭环控制后的故障波形如图3所示。可见，最大电流被限制在额定范围以内，故障后直流电压和电流在240 ms后完全恢复初始值，这在工程中能够接受。

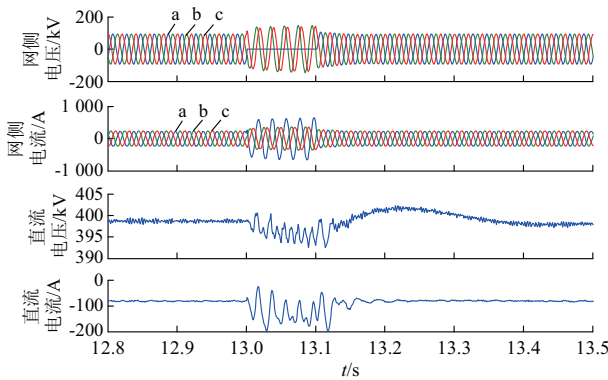


图3 故障电流抑制控制下的交流单相故障波形
Fig.3 Waveforms of AC single phase to earth fault with fault current suppression control

3.2 孤岛闭环控制下的三相故障

在网侧触发三相金属性接地短路故障，附录A图A6给出了没有采用图2所示改进控制环节时的结果。采用改进控制环节后，同样故障下的仿真结果如图4所示。

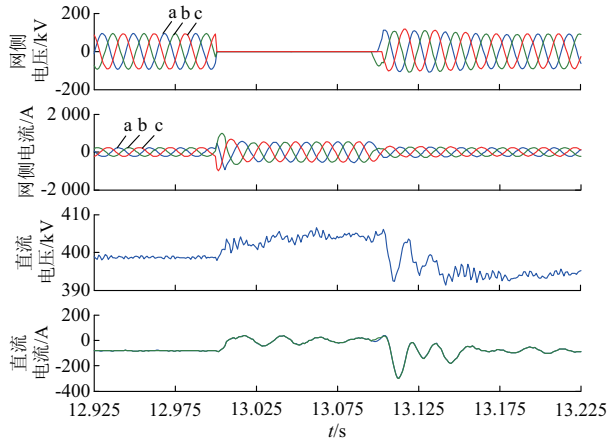


图4 改进电流闭环控制下的交流三相故障波形
Fig.4 Waveforms of AC three-phase to earth fault with improved current closed-loop control

对比上述结果,附录 A 图 A6 在没有改进电流限制环节作用下,网侧电流迅速上升至最大值 3 497 A,直流电压升高到 450 kV,过流保护动作闭锁跳闸。图 4 同样条件下,在电流限制控制作用下,孤岛运行发生瞬时故障情况下,网侧电流被限制在稳态情况下(0.5(标么值)),直流侧电压达到最大值 407 kV,具备限流故障穿越能力。主要原因在于,采用了基于故障电压测量的电流限制环节,将故障运行下的输出电流限制到 0.5(标么值),使得输出电流被限制在换流器过流保护动作值范围之内,保证

了换流器的持续运行,等待交流侧故障切除后,系统恢复正常运行,从而极大地提高了孤岛方式下电网的可靠性。另外直流电压有所增加属于正常,这是因为此时功率无法送出,导致直流侧电压上升,但仍在可接受范围内,不会引起直流过电压保护动作。

总结图 3、图 4 和附录 A 图 A5、图 A6 结果,将孤岛运行下改进故障限流方案后与改进前的运行参数进行比较。表 1 所示为相同工况下,采用改进策略前后发生故障期间关键电气量的对比。

表 1 改进前后的关键电气量对比
Table 1 Comparison of key electrical values before and after improvement

改进前后	网侧电流最大峰值/A			直流电压最大值/kV			直流电流最大值/A			运行结果		
	AG	AB	ABCG	AG	AB	ABCG	AG	AB	ABCG	AG	AB	ABCG
改进前	814.8	3 107.2	3 497.7	403.8	471.7	456.1	275.3	1 036.9	784.8	继续运行	跳闸	跳闸
改进后	664.0	1 294.4	1 004.2	402.3	408.1	407.0	200.4	437.3	300.2	继续运行	继续运行	继续运行

从以上结果明显看出,采用改进策略后,提高了换流器孤岛运行下的故障穿越能力,减小了穿越期间网侧电流及直流侧电流,从而减小了冲击,提高了换流器孤岛运行的可靠性。

3.3 孤岛闭环控制下的启动控制

有源方式下可以通过调制波预跟踪模式切换为闭环控制^[31],当换流站以无源模式运行时,不存在调制波预跟踪过程,若解锁时立即输出额定交流电压^[32],易产生较大的励磁涌流和电压、电流超调,而若解锁后初始电压从 0 开始逐渐上升,由于此时初始阶段电压过低,电压或电流的高频分量进入闭环系统,从而导致参考波越来越差,最终系统发散。为解决这两个问题,对图 2 最左侧启动参考电压 U_{ld}^* 和 U_{Lq}^* 做如下处理。本文采用解锁后电压 U_{ld}^* 参考波分段输出的策略:解锁初始参考值为 0(标么值),初始上升速率较快,如设置为 10 s^{-1} ,20 ms 后上升速率减慢,如减小为 0.05 s^{-1} ,从而实现无源模式的无冲击无扰动启动。启动波形结果如图 5 所示。

由图 5 可见,启动时刻虽然加快了上升速率,导致电压略有超调,但在绝缘允许范围内,在工程上可以接受,也没有启动瞬间高频引入,启动过程性能良好。另外,由于换流器在直流侧充电期间采用了优化的主动充电策略,使得换流阀模块在正式解锁之前已经充电至额定电压,因此实际解锁时的直流电压波动较小,在 0.25% 范围以内,达到较好效果。

4 结语

通过分析柔性直流无源孤岛控制方式下存在交流故障无法穿越的问题,结合柔性直流换流器输出电压控制原理,提出了一种具备故障电流抑制的孤

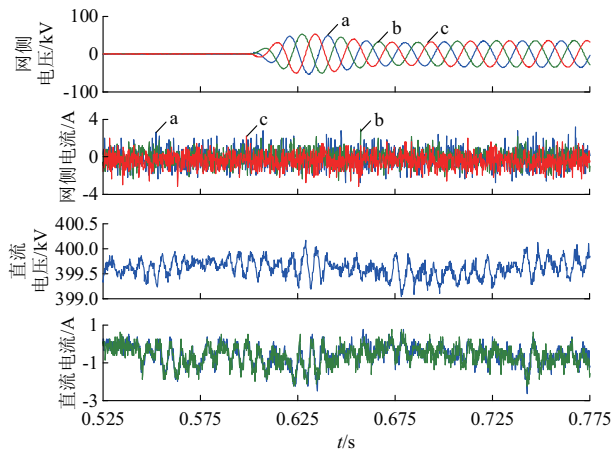


图 5 改进电流闭环控制下的启动波形
Fig.5 Starting-up waveforms with improved current closed-loop control

岛运行方式下的改进控制方式,以及该方式下的解锁启动方案。该方案通过电流闭环和限制环节的引入,以及解锁启动过程中不同阶段控制策略的调整,弥补了传统无源孤岛运行方式下交流故障导致换流器过流跳闸的缺陷,实现起来简单可靠,并且已在实际工程中得到了应用。

虽然采用该改进限制故障电流的方法可以在孤岛运行工况下限制短路电流,但该电流大小与交流系统保护的配合仍有待进一步深入研究。

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

参考文献

[1] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等.舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J].高电压技术,2014,40(8):2490-2496.

LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.

[2] 常浩, 厉璇, 马玉龙, 等. 舟山多端柔性直流输电工程直流系统放电特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 9-15.

CHANG Hao, LI Xuan, MA Yulong, et al. Discharge characteristics of DC system in Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 9-15.

[3] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.

DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.

[4] 董云龙, 杨勇, 田杰, 等. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电动态模拟系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 74-78. DOI: 10.7500/AEPS20130409007.

DONG Yunlong, YANG Yong, TIAN Jie, et al. Dynamic simulation system for modular multilevel converter based VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 74-78. DOI: 10.7500/AEPS20130409007.

[5] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 39-44.

HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 39-44.

[6] 梁少华, 田杰, 曹冬明, 等. 柔性直流输电系统控制保护方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 59-65.

LIANG Shaohua, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. A control and protection scheme for VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 59-65.

[7] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 新型多端高压直流输电系统应用及其控制[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 31-33.

HU Zhaoqing, MAO Chengxiong, LU Jiming. Application and control strategy of new multi-terminal HVDC system [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 31-33.

[8] 唐庚, 徐政, 薛英林, 等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电控制系统设计[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2773-2782.

TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Control design of multi-terminal HVDC based on modular multilevel converter [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2773-2782.

[9] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 344-355.

[10] ZHANG L, HARNEFORS L, NEE H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 783-793.

[11] ZHANG L, NEE H P, HARNEFORS L. Analysis of stability limitations of a VSC-HVDC link using power-synchronization control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1326-1337.

[12] 常非, 王一, 王一振, 等. 基于模块化多电平变换器的高压直流输电故障特性与控制保护[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2428-2434.

CHANG Fei, WANG Yi, WANG Yizhen, et al. Faults feature analysis and control protection strategies of modular multilevel converter based high voltage direct current [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2428-2434.

[13] 梁海峰, 李庚银, 李广凯, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 45-50.

LIANG Haifeng, LI Gengyin, LI Guangkai, et al. Simulation study of VSC-HVDC system connected to passive network [J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 45-50.

[14] 赵成勇, 马国鹏, 李广凯. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 调节特性研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(6): 39-43.

ZHAO Chengyong, MA Guopeng, LI Guangkai. Research on characteristics of regulation of VSC-HVDC supplying power to passive network [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2008, 35(6): 39-43.

[15] 杨用春, 赵成勇. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 控制性能实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 31-35.

YANG Yongchun, ZHAO Chengyong. Experimental study on control performance of VSC-HVDC connected to passive network [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 31-35.

[16] 王卫安, 桂卫华, 马雅青, 等. 向无源网络供电的模块化多电平换流器型高压直流输电系统控制器设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 751-761.

WANG Weian, GUI Weihua, MA Yaqing, et al. Control design for MMC-HVDC system connected to passive network [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 751-761.

[17] 陈海荣, 徐政. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 42-48.

CHEN Hairong, XU Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48.

[18] 管敏渊, 徐政. MMC 型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(12): 1-5.

GUAN Minyuan, XU Zheng. Direct voltage control of MMC-based VSC-HVDC system for passive networks [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 1-5.

[19] 刘昇, 徐政, 唐庚, 等. MMC-HVDC 联网及孤岛运行状态转换策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2152-2161.

LIU Sheng, XU Zheng, TANG Geng, et al. Study on MMC-HVDC switching scheme between grid-connected and passive islanding mode [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2152-2161.

[20] 王珂, 骆健, 杨胜春, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 启动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(S1): 277-281.

WANG Ke, LUO Jian, YANG Shengchun, et al. Startup procedures for the VSC-HVDC system supplying power to passive network [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(S1): 277-281.

[21] 杨冬儿, 滕本科. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 电压下陷问题研究[J]. 电力学报, 2013, 28(1): 22-27.

YANG Donger, TENG Benke. Study on voltage sag of VSC-HVDC supplying for passive network [J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(1): 22-27.

[22] TANG X, LU D D. Enhancement of voltage quality in a passive network supplied by a VSC-HVDC transmission under disturbances [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54(9): 45-54.

- [23] DU C, BOLLEN M H J, AGNEHOLM E, et al. A new control strategy of a VSC-HVDC system for high-quality supply of industrial plants[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2386-2394.
- [24] 管敏渊,徐政.向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J].电工技术学报,2013,28(2):255-263.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [25] DU C, AGNEHOLM E, OLSSON G. Comparison of different frequency controllers for a VSC-HVDC supplied system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2224-2232.
- [26] 阳岳希,杨杰,贺之渊,等.基于 MMC 的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(4):120-124.DOI: 10.7500/AEPS20160728001.
YANG Yuexi, YANG Jie, HE Zhiyuan, et al. Control strategy of MMC based back-to-back HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 120-124. DOI: 10.7500/AEPS20160728001.
- [27] 董云龙,凌卫家,田杰,等.舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J].电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
DONG Yunlong, LING Weijia, TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 169-175.
- [28] 文安,邓旭,魏承志,等.柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J].电力自动化设备,2014, 34(7):99-106.
WEN An, DENG Xu, WEI Chengzhi, et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operation of VSC-HVDC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 99-106.
- [29] 管敏渊,张静,刘强,等.柔性直流输电系统的联网和孤岛运行通用控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(15):103-109. DOI:10.7500/AEPS20140313002.
- GUAN Minyuan, ZHANG Jing, LIU Qiang, et al. Generalized control strategy for grid-connected and island operation of VSC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 103-109. DOI: 10.7500/AEPS20140313002.
- [30] 林畅,翟雪冰,高路,等.厦门柔性直流输电系统孤岛运行控制仿真研究[J].智能电网,2016,4(3):235-242.
LIN Chang, ZHAI Xuebing, GAO Lu, et al. Simulation study of control strategy for island operation of Xiamen VSC-HVDC [J]. Smart Grid, 2016, 4(3): 235-242.
- [31] 华文,赵晓明,黄晓明,等.模块化多电平柔性直流输电系统的启动策略[J].电力系统自动化,2015,39(11):51-57. DOI: 10.7500/AEPS20140707004.
HUA Wen, ZHAO Xiaoming, HUANG Xiaoming, et al. A startup strategy for modular multilevel converter based HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 51-57. DOI: 10.7500/AEPS20140707004.
- [32] 姬煜珂,赵成勇,李承昱,等.含新能源接入的柔性直流电网启动策略及仿真[J].电力系统及其自动化,2017,41(4):98-104. DOI:10.7500/AEPS20160813009.
JI Yuke, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Start-up strategy and simulation of flexible DC grid with renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 98-104. DOI: 10.7500/AEPS20160813009.

王 庆(1980—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:特高压直流输电及柔性直流输电。E-mail: wangke@nrec.com

卢 宇(1977—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:特高压直流输电及柔性直流输电。E-mail: Luy@nrec.com

胡兆庆(1976—),男,通信作者,博士,工程师,主要研究方向:电力电子在电力系统中的应用及柔性直流输电。E-mail: huzq@nrec.com

(编辑 章黎)

Fault Current Suppression Method for Flexible DC Transmission System Operating in Islanded Mode

WANG Qing¹, LU Yu², HU Zhaoqing², WANG Ke², LI Haiying², LIU Haibin^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

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

Abstract: Combined with the actual engineering needs, a fault current suppression and starting-up control method is proposed in view of the problem of over-current tripping after the AC side fault for the flexible DC transmission system operating in islanded mode. The method can satisfy the requirement of suppressing fault current under all kinds of AC faults in the islanded state, provide the preset fault current to AC system within its own capacity of the flexible DC device, and realize the normal startup procedure in the islanded operation state. Based on the real control and protection devices and the real-time closed-loop simulation system constructed by RTLAB, the proposed control strategy is verified. The results demonstrate that the proposed control strategy can improve the fault ride-through capability in contrast to the conventional control strategy, such as the amplitude frequency open-loop island control or the normal closed-loop current control strategy. Meanwhile, the starting-up control realizes the startup without impact in islanded operation mode.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900602).

Key words: flexible DC transmission; island; fault ride-through; starting-up control