

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.06.015

直流频率限制器参数整定及协调控制

李玲芳¹, 陈义宣¹, 朱欣春¹, 郭相阳², 徐 政², 董桓锋²

(1. 云南电网有限责任公司电网规划研究中心, 昆明 650011; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 异步联网方式下, 送端电网的频率稳定问题需要重点关注。在直流系统发生闭锁性故障后, 采用直流频率限制器(frequency limit controller FLC)进行故障调频能够抑制送端电网出现的高频问题。文中介绍了直流频率限制器的结构原理以及参数整定方法, 并针对直流频率限制器退出时可能发生的“二次动作”现象提出延时及比例参数切换的方法进行优化。最后针对多回直流频率限制器间的协调问题, 提出基于直流频率限制器作用系数的控制策略。结果表明, 文中设计的FLC能够对电网频率稳定实现有效控制多回直流FLC协调控制策略可以防止出现过调节现象。

关键词: 直流频率限制器; 频率稳定; 参数整定; 协调控制

Parameters Tuning and Coordination Control of DC Frequency Limit Controller

LI Lingfang¹, CHEN Yixuan¹, ZHU Xinchun¹, GUO Xiangyang², XU Zheng², DONG Huanfeng²

(1. Yunnan Grid Planning and Research Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: For asynchronous interconnection system, when a DC blocking fault occurs in DC system, the high frequency generated in the sending end network can be suppressed by using the frequency limit controller (FLC). This paper introduces the structure and parameters tuning method of FLC, and proposes a parameters optimization method to avoid FLC to act again when the FLC exits. Aiming at the coordination problem among multiple FLCs, a control strategy based on FLC's influencing coefficient is proposed. Further, an FLC is designed, and it is demonstrated that the FLC can realize effective control of frequency stability in the sending end network, and the control strategy for multiple FLCs can suppress the over tuning effectively.

Key words: frequency limit controller; frequency stability; parameters tuning; coordination control

0 引言

目前中国电力资源与电力需求呈逆向分布的特征^[1]。采用高压直流输电的方式将西部电力输送到东部负荷中心是中国电网发展的必然选择。根据直流输电系统所连接的两端交流电网是否属于同一个同步电网, 可以将直流输电系统划分为两类: 一类是直流两端属于一个同步网, 电网中交直流并列运行; 另一类是直流连接两个异步网, 两个异步网之间没有交流通道^[2]。对于第一种情况, 在直流输送大量功率的情况下, 一旦发生闭锁故障,

这部分由直流输送的功率将会转移到并列运行的交流通道上, 引起电网潮流大范围转移, 最终可能导致电网发生功角失稳^[3]。

若采用直流异步互联方式, 即使直流闭锁, 电网潮流也不会出现大范围转移, 功角失稳问题将得到很好解决。但是异步联网方式下, 直流闭锁会导致送端电网发电功率大量盈余, 引起送端电网频率上升, 危害电网频率稳定。这种情况下, 电网中一次调频动作较慢, 不能很快减小发电机输出功率, 如果在其余正常工作的直流输电系统上装设直流频率限制器, 由直流频率限制器根据电网频率偏

差快速输出附加功率信号,令正常工作的直流输电系统短时过负荷运行,可以减小电网最大频率偏差,维护电网频率稳定。

采用直流频率限制器提升电网频率稳定,目前已有多篇文献报道。文[4]针对送端孤岛运行方式,基于时域仿真说明附加直流频率控制可明显提高系统稳定运行能力;文[5]提出综合利用机组调频、直流频率控制以及切机措施可以提高送端孤岛电网的频率稳定性;文[6]通过改变调速器一次调频与FLC的死区,解决了FLC和一次调频动作不协调的问题;文[7]针对糯扎渡直流频率限制器对FLC结构原理做了说明;文[8]研究了FLC对电网无功功率的影响,提出一种基于无功功率变化率的控制策略来提高送端电网的电压稳定性。上述文献从不同角度对直流频率限制器做了介绍,但是针对异步互联方式下,直流频率限制器的参数整定方法以及多回直流频率限制器间的协调控制需要进一步研究。

文中针对直流异步互联下送端电网的频率稳定问题,研究在直流闭锁故障时FLC的故障调频作用。具体包括FLC的结构设计、参数整定以及多回FLC间的协调控制。

1 FLC结构设计

目前文献中出现较多的FLC结构见图1,电网的频率偏差首先经过FLC的死区环节,当频率偏差超过死区设定值时,通过PI控制器向直流系统输出一个附加功率信号,通过改变直流功率实现对电网频率的控制。

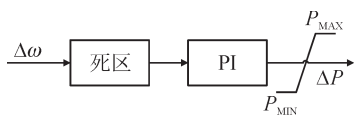


图1 直流频率限制器结构

Fig. 1 Structure of the FLC

一旦电网频率超出FLC死区值,FLC将按照图1的结构动作。这样存在的问题是电网中负荷扰动造成的频率波动也可能引起FLC动作,虽然这种扰动持续时间短,不会对电网稳定造成过大危害,但是为了保持直流输电稳定,FLC还是应避免在这种情况下动作。当直流闭锁发生时,通过控制中心向FLC发出故障信号,可以使FLC确定直流故障,避免在负荷扰动时动作。但是,控制中心发出的信号传输过程中可能出现误差,为防止FLC误动作,还应当给FLC设定延时环节,确认故障类型。

为使图1中的FLC结构在故障调频中更好地发挥作用,文中认为应做出如下两点改进:一是在FLC

中加上延时环节,二是将PI控制器改为比例控制器,重新设计的FLC结构见图2。

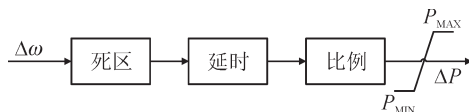


图2 重新设计的直流频率限制器结构

Fig. 2 Redesigned FLC structure

为了保证控制的实时性,文中采用的延时环节不是传递函数中用 $e^{-\tau s}$ 表示的将输入信号延迟时间 τ 后向外产生输出信号,而是输入信号在延迟时间内不产生输出信号,超过延迟时间后,输入信号开始产生输出信号,延时环节见图3。

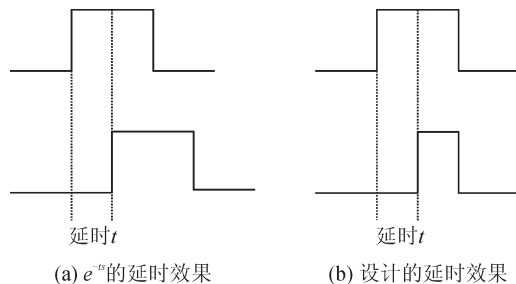


图3 延时环节

Fig. 3 Time delay process

图1中FLC采用PI控制器,一般而言,PI控制器中积分环节的作用是消除静差,对电网频率偏差实现无差调节。但是FLC直流闭锁时进行故障调频的根本目的是抑制电网出现的最大频率偏差,这个过程不考虑消除静差。另外,为了有效抑制电网频率偏差,在直流输电系统发生故障期间,需要通过FLC的调节功能使正常的直流输电系统输出较高功率。在电网频率下降到FLC死区范围之内后,FLC的退出相当于在电网中切除一个较大的负荷,将引起电网频率再次升高,如果频率偏差再次超过FLC的死区值将引起FLC“二次动作”,对电网频率稳定造成不利影响。而且,FLC退出时刻正常的直流输电系统的输出功率越大,FLC正常退出越难。采用PI环节的FLC由于积分环节对输入信号的“积累”,在退出阶段的输出功率高于只含有比例环节的FLC,不利于FLC退出。因此,应当在FLC中去掉积分环节。

2 FLC参数整定

根据上节设计的FLC的结构可知,FLC的参数包括死区设定值、延时时间、比例参数以及输出限幅值。其中输出限幅值由直流系统自身的过负荷能力决定,所以FLC中需要整定的参数只有死区设定值、延时时间和比例参数。

2.1 死区设定值整定

设置 FLC 的目的是在直流闭锁故障发生时维护送端电网的频率稳定^[9-13]。因此 FLC 死区整定的第一个原则就是:当电网中某条直流发生闭锁故障时,正常工作的 FLC 能够快速动作。对于一个含有多条直流的电网而言,就要求当输送功率最小的那条直流(最小直流)发生闭锁时 FLC 保证动作。为了能让 FLC 最大限度发挥功能,FLC 死区值必须小于最小直流闭锁造成的最大频率偏差的 35%~65%。

当直流闭锁故障发生之后,电网频率会在调速器一次调频作用下重新恢复到稳定值,如果这个稳定值超出 FLC 的死区值,FLC 会一直动作,而直流线路只能在短时间内处于高过载状态。因此,FLC 死区整定的第二个原则为:FLC 不可以一直输出高附加功率。对于一个含有多条直流的电网而言,要求 FLC 死区值大于输送功率最大的那路直流(简称最大直流)故障后电网频率偏差的稳定值。

根据以上两条原则可以确定出 FLC 死区值的范围。但是如果电网中输送功率最大和最小的直流功率相差较大,那么死区范围就会较小甚至死区下限会高于死区上限。这种情况下,文中建议采用双死区,即分开设置动作死区和退出死区,实现对 FLC 死区取值的灵活设置。

2.2 延时时间整定

由 FLC 的结构设计可知,FLC 延时环节的主要功能是防止 FLC 误动作。但是为了能够抑制电网最大频率偏差,延时时间不应过长。文中建议选取的延时时间为 0.1~0.2 s。

另外,FLC 退出时对电网而言相当于大负荷切除,会造成电网频率再次上升,触发 FLC 的“二次动作”。所以,FLC 退出时刻输出的附加功率必须要小,在此可以给 FLC 设定一段退出延时时间,在退出延时期内,随着电网频率偏差下降,FLC 输出的附加功率相应减小,可以防止 FLC 退出后发生“二次动作”。退出延时时间可以根据直流过负荷时间确定,文中建议选取的 FLC 退出延时时间为 2~6 s。

2.3 比例参数整定

FLC 的比例参数直接影响 FLC 的输出结果。通过延时环节和死区环节可以确定电网是否发生直流闭锁故障,为了令 FLC 在故障时最有效的抑制电网频率偏差,比例参数的选取方法为

$$k_p = \frac{p_{\max}}{f_{\text{band}}} \quad (1)$$

式(1)中: k_p 为 FLC 比例参数; $p_{\max}$ 为附加功率输出上限; f_{band} 为死区设定值。根据式(1)可知:一旦超

过死区值,FLC 将顶值输出进行故障调频。

另外,为了能让 FLC 正常退出,可以考虑在 FLC 退出延时阶段切换为小比例参数,减小 FLC 退出阶段的输出。同时,对于电网而言,相当于负荷分次切除,相比一次性切除大负荷造成的频率波动明显减小。

3 仿真验证

文中采用的两区四机异步互联电网^[14]在电力系统仿真软件 PSS/E 中进行仿真验证,见图 4。图 4 中区域 1 通过直流 D_1 和 D_2 向区域 2 输送 400 MW 有功功率,其中 D_1 、 D_2 各输送 200 MW。在 1 s 时刻直流 D_2 发生直流闭锁故障,对应区域 1 的电网频率偏差见图 5。由图 5 可知,电网最大频率偏差为 0.41 Hz,稳定后的频率偏差为 0.177 Hz。由于直流 D_1 和 D_2 的输送功率相同,所以电网中 D_2 既是最大直流,也是最小直流。根据 FLC 死区值整定原则,文中设定 FLC 的死区值为 0.2 Hz。

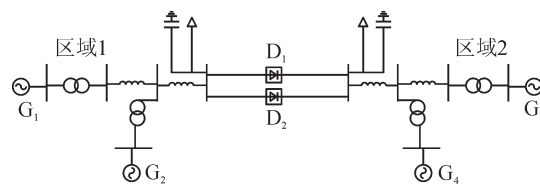


图4 直流异步互联系统

Fig. 4 Asynchronous interconnection system

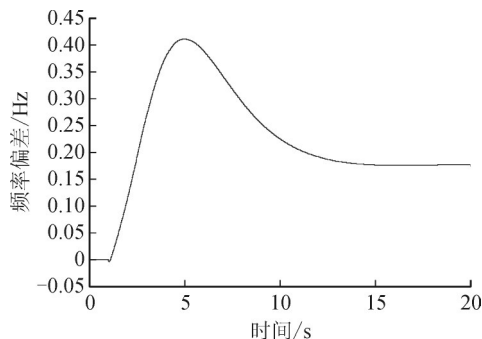


图5 电网频率偏差

Fig. 5 Grid frequency deviation

设定 FLC 的延时时间。首先选取投入延时为 0.2 s,防止 FLC 发生误动作。由图 5 可知电网频率偏差在 0.2 Hz 以上的时间为 8.74 s,通常直流短时过负荷时间在 10 s 左右,FLC 作用下电网频率偏差在死区外的时间将缩短,且在退出延时阶段直流输出的附加功率下降,过负荷时间也可以相应延长。文中设定该系统中 FLC 的退出延时时间为 3 s。

取直流频率限制器附加功率输出上限为 50 MW,根据式(1)可整定 FLC 的比例参数为 250 MW/Hz。向电网投入 FLC 后重新进行直流闭锁故障仿真,可

得结果见图6。

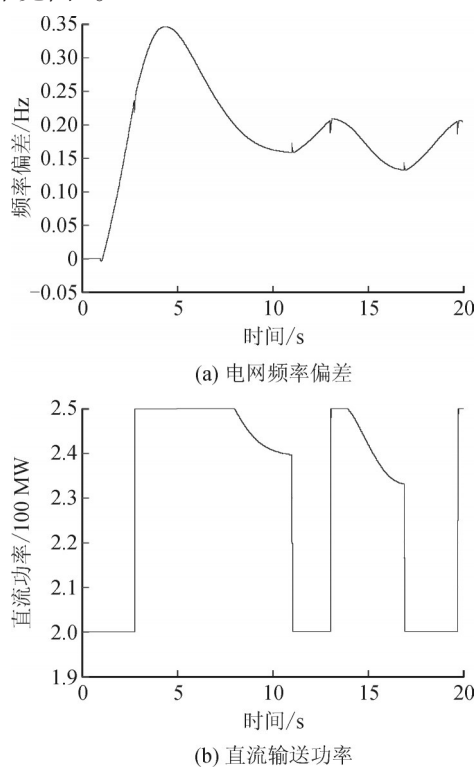


图6 投入FLC后的变化情况

Fig. 6 Effects of FLC

由图6可知,投入FLC后,电网最大频率偏差由0.41 Hz降到0.346 Hz,实现对电网最大频率偏差的抑制。电网频率在2.6 s时刻达到FLC死区值0.2 Hz,经过0.2 s延时,在2.8 s时刻,FLC顶值输出50 MW的功率,到8 s时刻,电网频率偏差回到0.2 Hz,经过3 s延时,FLC退出动作。FLC的连续动作时间为8.2 s,满足直流的过负荷要求。

但是由图6可知,FLC发生“二次动作”。原因如前文所述是FLC退出时的功率过大。“二次动作”会让直流刚结束过负荷状态后又进入过负荷状态,且引起了电网频率的波动,既不利于直流系统的安全稳定,也不利于电网频率稳定。解决的方法在前文FLC的参数整定中已有论述,一方面是延长FLC的退出延时时间,另一方面是在FLC退出阶段切换到小比例参数,二者皆可以减小FLC退出时刻输出的附加功率,防止FLC发生“二次动作”。设定FLC的退出延时为6 s,退出阶段比例参数为50 MW/Hz。进行仿真验证,结果见图7。

由图7可知,经过对FLC退出过程的优化,FLC不再发生“二次动作”。同时优化后的电网最大频率偏差与优化前一致,不影响FLC对电网频率偏差的抑制。

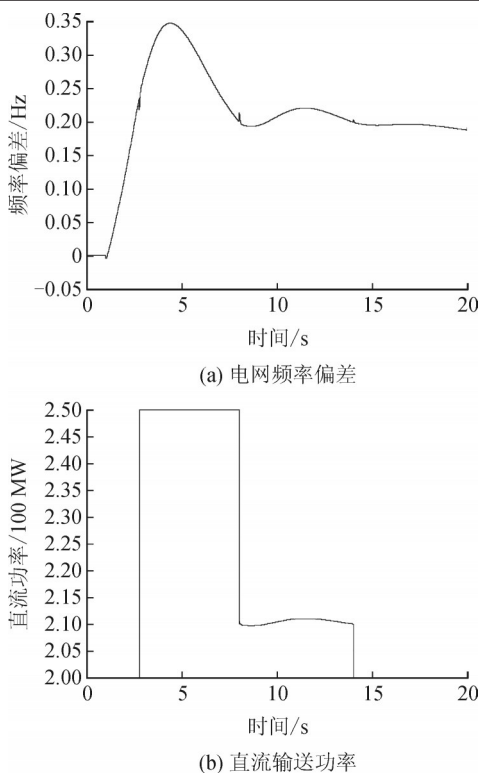


图7 优化效果

Fig. 7 Optimization effect

4 多回FLC间的协调控制

当电网中有多回FLC时,如果多回FLC在故障下同时动作,可能造成FLC输出的附加功率总和超过了电网盈余的功率值,产生过调节的问题^[15-19]。因此需要考虑多回FLC间的协调控制。

首先,可以通过调小所有FLC的比例参数的方法使系统不产生过调节。但是调小FLC的比例参数,FLC抑制最大频率偏差的能力也随之减弱,不能充分发挥作用。若选择不调小FLC的比例参数,就需要考虑在故障下多回FLC间的协调。在一个大电网中,当一条直流故障时,其他正常直流即使输出相同的附加功率对系统频率稳定造成的影响也是不同的。不同的直流发生故障,就要找到对应最有效的FLC动作,这样一方面可令FLC充分发挥作用,另一方面减少了其余FLC的动作次数,使其他直流处于正常工作状态。

文中选取最有效FLC的方法如下:首先对一条直流进行闭锁故障测试,测出产生的最大频率偏差 f_1 ,然后其余正常直流分别投入FLC,测出各直流投入FLC后电网的最大频率偏差 f_2 ,记 $\Delta f = f_1 - f_2$,FLC输出的最大附加功率为 ΔP ,可计算出FLC的作用系数 d 为

$$d = \frac{\Delta f}{\Delta P} \quad (2)$$

作用系数越大,说明 FLC 作用越有效。以云南电网为例进行说明。

云南电网与南方电网主网通过多直流异步互联。首先令楚穗直流发生双极闭锁,在普侨直流、金中直流和鲁西直流分别投入 FLC。通过式(2)计算得到的各条直流 FLC 的作用系数见表 1。

表 1 FLC 作用系数

Table 1 FLC influence coefficient

直流线路	普侨	金中	鲁西
作用系数/(Hz·kW ⁻¹)	0.147	0.021	0.074

由计算结果可知,普侨直流装设 FLC 对于抑制楚穗直流故障是最有效的。设置这三回 FLC 的最大输出上限为统一值,再次仿真得到的结果见图 8。图 8 证明 FLC 作用系数越大,抑制频率偏差最大值的能力越强。

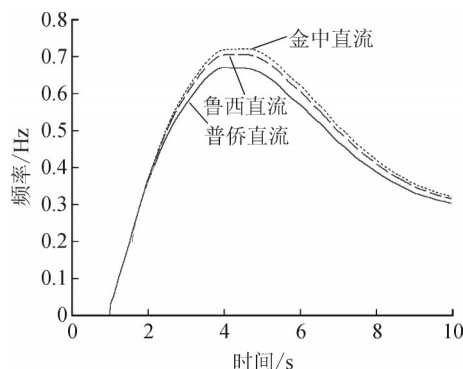


图 8 频率偏差对比

Fig. 8 Comparison of frequency deviation

基于 FLC 作用系数,可以得到 FLC 的动作表。由此可确定多回 FLC 协调控制的基本动作流程图见图 9。直流发生闭锁后,故障直流向控制中心发出直流故障信号,控制中心通过 FLC 动作表选择最优的 FLC,接下来判断该回 FLC 是否故障以及投入情况,决定是否选择投入该回 FLC。选择完毕并投入 FLC 后,控制中心考察电网的频率情况,决定是否继续投入 FLC,增大输出的附加功率。

通过上述控制方法,可以保证在故障发生后能让最有效的 FLC 优先动作,投入的 FLC 数量完全由控制中心根据电网频率偏差决定,防止过调节发生,实现对多回 FLC 的协调控制。

5 结论

文中对直流频率限制器参数整定与协调控制问题做了研究。得出的结论如下:

1)文中对 FLC 结构进行重新设计,提出将 PI 控制器改为比例控制器,并加入延时环节,使 FLC 在故障调频中更好地发挥作用;

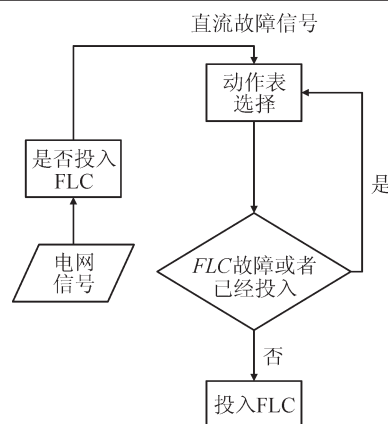


图 9 多回 FLC 协调控制流程图

Fig. 9 Multi FLC coordinated control flowchart

2)提出直流频率限制器死区值、延时时间以及比例参数的整定方法,并针对直流频率限制器退出工作时出现的“二次动作”对参数进行优化,防止直流频率限制器“二次动作”;

3)提出 FLC 作用系数,并制订 FLC 动作表,保证故障发生时能让最有效的 FLC 优先动作,实现多回 FLC 间的协调控制。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.
LIU Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [2] 徐 政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2004: 3-5.
XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC and HVDC hybrid power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2004: 3-5.
- [3] 吕清洁. 送端电网稳定性若干问题及控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
LYU Qingjie. Research on the Stability and control strategy of sending end network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [4] 马玉龙, 石 岩, 殷威扬, 等. HVDC 送端孤岛运行方式的附加控制策略[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 22-25.
MA Yulong, SHI Yan, YIN Weiyang, et al. Additional control strategy for islanded AC system at sending terminal of HVDC[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 22-25.
- [5] 赵 良, 覃 琴, 郭 强, 等. 中蒙直流输电工程送端孤岛频率控制问题[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 22-25.
ZHAO Liang, QIN Qin, GUO Qiang, et al. Frequency control for islanded system at sending terminal of HVDC power transmission from China to Mongolia[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 22-25.
- [6] 陈亦平, 程 哲, 张 昆, 等. 高压直流输电系统孤岛运行调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 96-102.

- CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4):96-102.
- [7] 杜 斌, 柳勇军, 涂 亮, 等. 糯扎渡直流频率限制控制器研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(5):27-31.
- DU Bin, LIU Yongjun, TU Liang, et al. Study on the frequency limit control of Nuozhadu DC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(5): 27-31.
- [8] 吕思卓, 郑 超, 杨金刚, 等. 送端直流孤岛系统频率限制器优化控制策略[J]. 电力建设, 2016(2):107-111.
- LYU Sizhuo, ZHENG Chao, YANG Jingang, et al. FLC optimization control strategy of islanded HVDC sending system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(2): 107-111.
- [9] 闵 勇. 电力系统稳定分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2016:180-181
- MIN Yong. Power system stability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 180-181.
- [10] 王华伟, 韩民晓, 范园园, 等. 呼辽直流孤岛运行方式下送端系统频率特性及控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(5):1401-1406.
- WANG Huawei, HAN Minxiao, FAN Yuanyuan, et al. Sending end frequency characteristics under islanded operation mode of HVDC transmission system from Hulun Buir to Liaoning and corresponding control strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1041-1046.
- [11] 李亚男, 马为民, 殷威扬, 等. 向家坝—上海特高压直流系统孤岛运行方式[J]. 高电压技术, 2010, 36(1):185-189.
- LI Yanan, MA Weiming, YIN Weiyang, et al. Island operation modes XS800 UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 185-189.
- [12] 陈汉雄, 莫 骏. 双侧频率调制改善特高压直流输电系统暂态稳定性研究[J]. 中国电力, 2009, 42(2):34-38.
- CHEN Hanxiong, MO Jun. Study of DC bilateral frequency power modulation to improve UHVDC transient stability[J]. Electric Power, 2009, 42(2): 34-38.
- [13] 马志恒. 异步联网系统频率稳定性影响分析及对策研究[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- MA Zhiheng. Analysis and strategy research of frequency stability of asynchronous interconnection grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [14] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994: 262-263.
- [15] 魏 亮, 王渝红, 李兴源, 等. 高压直流输电送端孤岛运行附加频率控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1):143-148.
- WEI Liang, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Design of additional frequency controller for islanded sending - end operation of HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 143-148.
- [16] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70.
- ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.
- [17] 周 鑫, 孙海顺. 一种采用直流紧急控制的特高压联络线功率摇摆 峰值抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10):28-35.
- ZHOU Xin, SUN Haishun. A swing peak suppression strategy of UHV tie - line power flow based on HVDC emergency control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10):28-35.
- [18] 赵 强, 王丽敏, 刘肇旭. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案[J]. 电网技术, 2009, 33(8):35-40.
- ZHAO Qiang, WANG Limin, LIU Zhaoxu. Study on dynamic frequency characteristics and coordinative under - frequency load shedding scheme for nationwide interconnected power grid of China[J]. Power System Technology, 2009, 33(8):35-40.
- [19] 张志强, 徐友平, 袁荣湘, 等. 大型互联区域电网解列后送端电网频率特性及高频切机方案[J]. 电网技术, 2015, 39(1):288-293.
- ZHANG Zhiqiang, XU Youping, YUAN Rongxiang, et al. Frequency characteristics of power grid at sending end of split large - scale interconnected regional power grid and corresponding over-frequency generator-tripping scheme[J]. Power System Technology, 2015, 39(1):288-293.
- 李玲芳(1974—), 女, 高级工程师, 从事电力系统分析工作。
- 陈义宣(1982—), 男, 工程师, 从事电力系统分析工作。
- 朱欣春(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度运行管理工作。
- 郭相阳(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大规模交直流电力系统分析。
- 徐 政(1962—), 男, 博士, 主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术。
- 董恒铎(1990—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大规模交直流电力系统分析。