

滇西北直流频率限制控制研究及工程应用

张力飞^{1,2}, 郭琦^{1,2}, 夏成军³, 欧开健^{1,2}, 李书勇^{1,2}, 朱益华^{1,2}

(1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510663; 2. 中国南方电网公司电网仿真重点实验室, 广东 广州 510663; 3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要:直流频率限制控制(frequency limit controller, FLC)是电网频率稳定控制的重要措施,在直流工程中被广泛使用,滇西北直流工程面临着云南电网与南方电网主网异步联网运行后频率稳定性风险增大、投产初期送端机组开机量不足等问题,FLC的配置至关重要。文中分析了南方电网现有直流工程中采用的两种FLC控制逻辑,通过仿真试验对两种控制逻辑响应结果进行了比较。对滇西北直流FLC配置、参数选取进行了说明,针对孤岛系统下机组跳闸、阀组闭锁等典型故障下FLC响应特性进行了仿真验证,仿真与现场的频率调制输出特性一致。

关键词:直流工程; 孤岛运行; 频率稳定; RTDS; 直流频率限制器

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)05-0109-06

0 引言

滇西北送广东 ± 800 kV特高压直流输电工程(简称“滇西北直流工程”)采用 ± 800 kV直流输电方式,直流额定输电容量为5000 MW,工程起点位于云南省大理州剑川县青松换流站,直流落点为广东省深圳市宝安区东方换流站,线路长度为1953 km,是云南电力外送的一项重要直流工程。西北直流的主要运行方式为联网方式,在送端交流联络线因故障跳开后,要求直流在孤岛方式下能平稳运行。但被动进入孤岛后送端交流系统容量小、抗扰动能力差,同时发生机组跳闸等故障,系统内交流有功难以达到平衡,导致系统频率失稳,孤岛系统崩溃^[1-5]。孤岛方式下频率波动问题严重影响了直流系统运行稳定性,针对孤岛系统的频率控制,各方展开了深入研究。

随着直流工程的陆续投产,云南电网通过金中直流、观音岩直流、鲁西背靠背与广西电网相连,通过楚穗、普侨、牛从、滇西北直流与广东电网相连,从而实现云南电网与南方电网主网异步运行,云南电网相当于大孤网运行。文献[6—15]指出利用直流频率限制器(frequency limit controller, FLC)能够提高孤网系统抵御功率扰动的能力,增强孤岛系统频率的稳定性。文献[3]通过仿真分析孤岛方式下优先利用直流系统频率限制器平衡功率波动,放大机组一次调频死区作为后备措施,优先调整机组调

率,利用FLC自动跟随的调频策略,能保持孤岛系统频率稳定。文献[13—14]针对糯扎渡直流的频率调制功能FLC结构及原理进行了分析,并对参数选取给出建议值,对FLC实际效果进行了仿真。

本文首先介绍了目前南方电网现有直流工程中采用的两种FLC控制逻辑,通过仿真试验比较了两种控制逻辑的响应特性,然后对滇西北直流FLC配置、参数选取进行了详细说明。最后选取孤岛系统下机组跳闸、阀组闭锁等典型故障对滇西北直流FLC功能进行了仿真验证。

1 现有的两种FLC控制逻辑比较

目前南网中投入的直流工程采用了西门子和ABB两种技术路线,滇西北直流、金中直流分别采用西门子和ABB技术路线。两套FLC控制主环逻辑存在较大差异,具体如图1,图2所示。图1中, $D_{F_{\max}}$ 为频差的最大值; $D_{F_{\min}}$ 为频差的最小值; F_{band} 为频差死区的限制范围; P_{modmax} 为直流功率调制量上限; P_{modmin} 为直流功率调制量下限。滇西北FLC控制逻辑主环设置两个PI环节同时计算FLC正向或负向调节量,通过限幅值实现最终有效输出。当频率进入死区后,直接对两个积分器叠加反向量而实现快速复归清零。而图2的金中直流FLC控制逻辑中,频率正向越限和反向越限的调制量共用积分器,当频差进入死区后,需要维持在死区内60 s后,积分器通过0.1倍负反馈系数进行缓慢清零。在频率限制越限恢复过程中,滇西北直流在频率进入死区后FLC调制输出量迅速返回至0,减少直流恢复至稳态运行的时间。

收稿日期:2018-06-03;修回日期:2018-06-29

基金项目:国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金重点支持项目(U1766213)

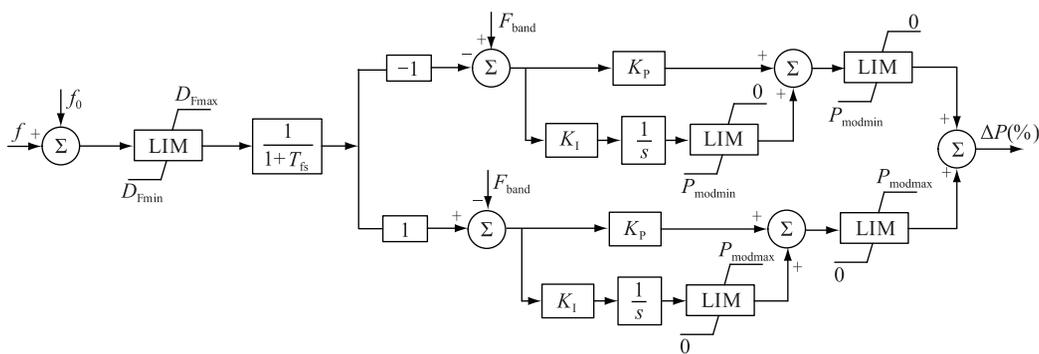


图1 滇西北直流频率限制模型

Fig.1 DXB frequency limit model block diagram

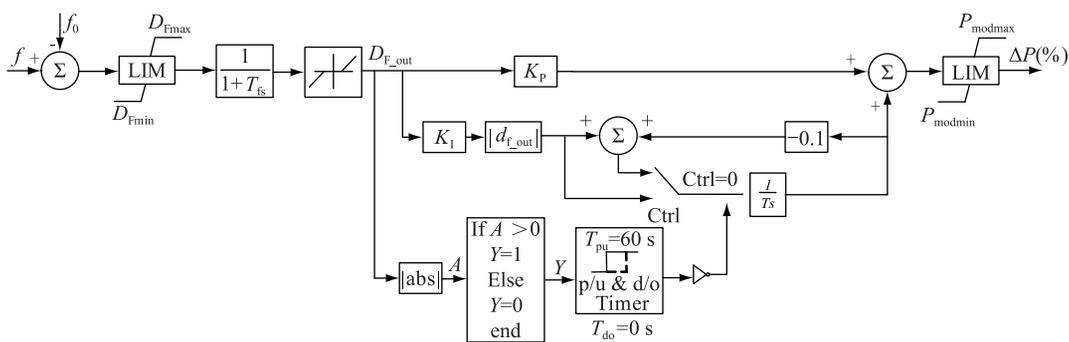


图2 金中直流频率限制模型

Fig.2 JZ frequency limit model block diagram

基于加拿大 Manitoba 直流研究中心开发的实时数字仿真器 (real time digital simulator, RTDS) 搭建滇西北直流和金中直流控制保护软件模型^[16-18], 利用 RTDS 录波回放的功能, 对同一频率波形进行录波回放, 得到滇西北直流和金中直流在发生相同的频率越限事故时 FLC 输出响应特性, 响应情况如图 3 所示。

图 3 中, 频率越限后, 滇西北直流和金中直流 FLC 控制快速上调, 达到最大调制量 0.2 p.u., 增大直流输出功率, 抑制频率上升; 越限后 FLC 均保持最大调制输出; 频率恢复进死区 (± 0.1 Hz) 后, 滇西北直流 FLC 调制输出量迅速降低至 0, 而金中直流 FLC 调制输出量维持 60 s 后, 再缓慢降低。可见滇西北直流中采用的 FLC 控制逻辑, 有利于直流在 FLC 动作后快速恢复至稳定运行, 缩短直流系统过负荷运行时间。

2 滇西北频率控制功能配置

滇西北直流输电工程控制保护系统中 FLC 功能配置在直流极控系统中^[16-19], 可以由运行人员在 HMI 操作界面上投入或退出, 频率死区也可由运行人员在操作界面上设定, 便于运行人员根据实际运行要求设定频率死区。

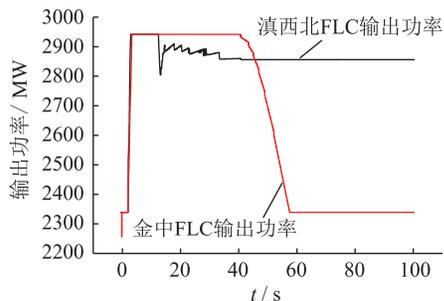
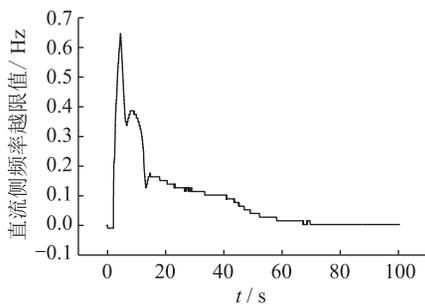


图3 频率越限仿真波形

Fig.3 FLC simulation waveform of DXB HVDC and JZ HVDC

运行人员界面中, 联网及孤岛方式下 FLC 功能投入/退出可在新松站和东方站独立投退, 对应的联网或孤岛下的频率限制死区值在新松站和东方站独立设置, 分别整定。

在两站 FLC 功能均投入时, 两站 FLC 输出的功

率调制量累加到一起,获得最终的 FLC 功率调制量,FLC 的输出功率调制值在两极间基于各极的直流电压进行分配。FLC 功能投入后将自动根据两端换流站的频率变化量调制直流功率信号,当直流极控系统失去站间通信时,整流侧的 FLC 功能仍然有效,逆变侧 FLC 功能失效。

因送端负荷规模远小于受端且受端主网调频备用安排及安全稳定防线配置可满足频率稳定运行要求,南方电网暂未投入受端 FLC 控制。

FLC 参数定值设置如表 1 所示。

表 1 FLC 参数定值表

Tab.1 FLC parameter table

参数名称	数值
F_{Band} (联网)	0.15 Hz
F_{Band} (孤岛)	0.1 Hz
P_{modmax}	+20%
P_{modmin}	-50%
K_p	30
K_i	22.2

2.1 FLC 调节范围

参照直流控制系统设计规范,直流 FLC 调节范围上限通常为 0~0.3 p.u.,下限通常为-0.5~0 p.u.,调节上下限的设置还需结合滇西北直流工程直流控制系统快速调节功率能力考虑。

滇西北直流工程在厂内测试及现场调试阶段均开展了电流阶跃试验,具备快速向下调节 0.5 p.u. 直流功率的能力;向上调节主要考虑换流站的无功电压支撑能力及控制系统长期过负荷能力。滇西北直流工程短时(2 h)过负荷能力为 1.2 p.u.,超过 1.2 p.u.则进入暂态(3 s)过负荷能力。

结合滇西直流工程实际,滇西北直流 FLC 调节范围选取上限为+0.2 p.u.,下限为-0.5 p.u.。

2.2 FLC 调节死区

FLC 调节死区设置需综合考虑与送端机组一次调频协调配合及同期并网配合。依据南方电网目前主要调频机组的死区设置(水电机组的一次调频死区为 0.05 Hz,火电机组为 0.033 Hz),直流 FLC 死区设置应大于 0.05 Hz。

由于系统同期设备频差定值设定为 0.2 Hz,为便于孤岛转并网运行时的自动准同期并网操作,要求孤岛系统稳态频率波动应小于 0.2 Hz。同时 FLC 死区设置过小,小扰动时会导致 FLC 频繁动作,死区范围不能设置过小。综上,孤岛方式下 FLC 死区(FBand)范围设定为 0.1 Hz,联网方式下 FLC 死区范围设定为 0.15 Hz。

2.3 K_p 和 K_i 参数选取

参照以往工程的经验值设置,选取若干组参数,在孤岛下进行 FLC 参数 K_p 、 K_i 的灵敏度分析。

选取孤岛系统黄登电厂 2 台机组发生跳闸故障,故障前单机出力 475 MW,FLC 参数设置如下: $F_{band}=0.1$ Hz, $P_{modmax}=+0.2$ p.u., $P_{modmin}=-0.5$ p.u., $K_i=22.2$,仿真对比 K_p 选取不同数值情况下系统响应情况,见图 4 和图 5。由仿真可见, K_p 参数越小情况下,动态过程中频差越大,动态阻尼越小,对扰动后系统稳定不利;随 K_p 增大,最低频率有所提高,但频率恢复过程变长,动态性能差, K_p 取 30。

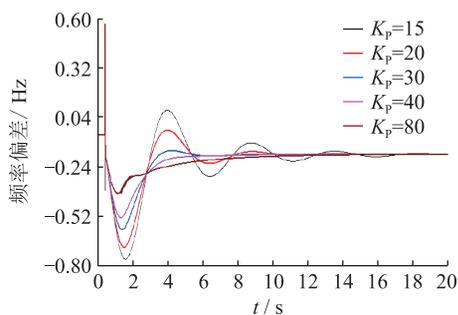


图 4 新松站母线频率偏差

Fig. 4 Frequency deviation of rectifier

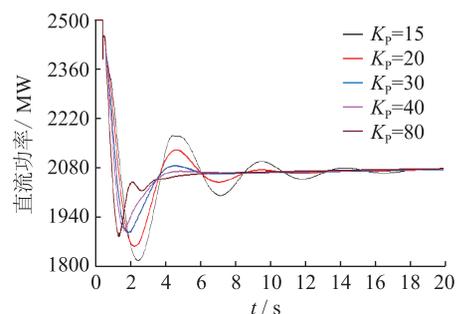


图 5 滇西北直流功率

Fig. 5 DC power waveform

相同工况下,对积分增益 K_i 进行灵敏度分析, K_p 取 30,仿真对比 K_i 取不同数值下系统响应情况,见图 6 和图 7。由仿真结果可见, K_i 越小,系统最低频率越低,恢复过程越长; K_i 越大,直流功率恢复过程波动越大,稳定性弱, K_i 取 22.2。

3 滇西北 FLC 性能仿真研究

基于 RTDS 仿真平台及南瑞继保开发的 PCS9500 直流控制保护系统,建立滇西北 RTDS 实时仿真试验系统。通过搭建滇西北±800 kV 特高压直流输电闭环系统模型,研究滇西北直流系统 FLC 功能在孤岛运行方式下的控制特性。

3.1 FLC 功能投入,送端 1 台机组跳闸故障

工况:滇西北直流孤岛方式运行,双极四阀组

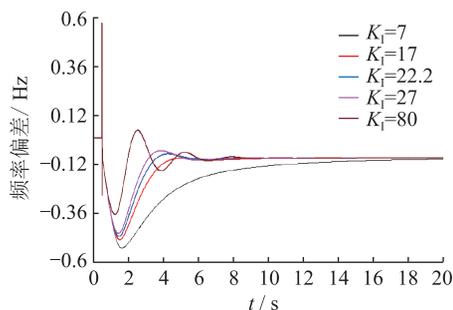


图6 新松站母线频率偏差

Fig. 6 Frequency deviation of rectifier

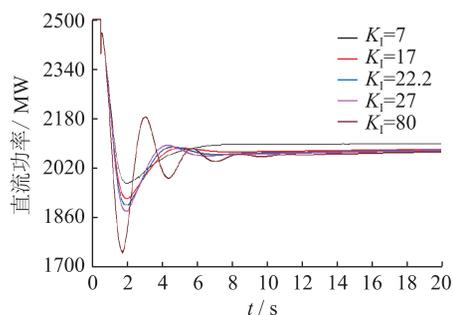


图7 滇西北直流功率

Fig. 7 DC power waveform

全压运行,直流功率水平 5000 MW,送端黄登电厂 1 台机跳闸故障,故障前机组出力 477 MW,FLC 投入,系统响应情况如图 8(a) 所示。

故障前,送端交流母线频率偏高,黄登电厂 1 台机跳闸情况下,直流功率大于机组出力,送端交流系统频率下降,频差低于 FLC 死区下限之后,FLC 根据频差输出调制量降低直流功率参考值,使直流功率与机组有功出力相匹配,保证系统稳定。最终系统频率稳定在 49.9 Hz,动态过程中系统频率最低 49.59 Hz,直流功率最终稳定在 4600 MW。

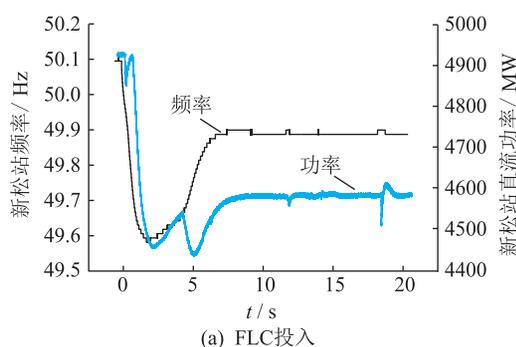
3.2 FLC 功能退出,送端 1 台机组跳闸故障

滇西北直流孤岛方式运行,双极四阀组全压运行,直流功率水平 5000 MW,送端黄登电厂 1 台机跳闸故障,故障前机组出力 477 MW,FLC 退出,系统响应情况如图 8(b) 所示。

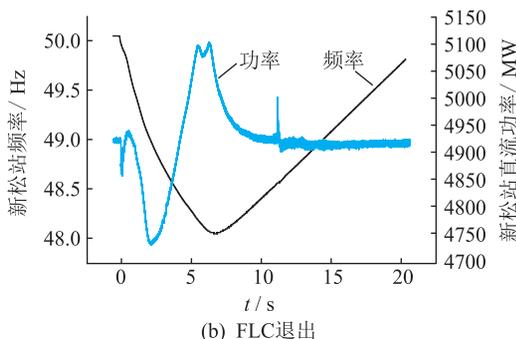
黄登电厂 1 台机跳闸情况下,直流系统功率参考值保持不变,大于机组出力。无 FLC 情况下为维持系统有功平衡,根据机组有功频率特性,机组转速降低以增加有功出力,孤岛交流系统频率持续降低,进而导致孤岛系统频率持续降低,进而导致孤岛系统频率失稳。

3.3 直流故障闭锁

滇西北直流孤岛方式运行,双极四阀组全压运行,直流功率水平 5000 MW,直流系统单阀组故障闭锁,切黄登 2 台机共 980 MW,FLC 投入,系统响应



(a) FLC投入



(b) FLC退出

图8 黄登 1 台机组跳闸后系统响应曲线

Fig.8 Response curve of the system after the trip of a unit

情况如图 9 所示。

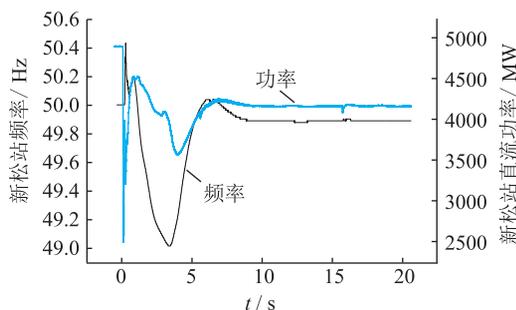


图9 发生单阀故障闭锁后系统响应曲线

Fig.9 Response curve of the system after a single valve blocked

滇西北直流双极运行情况下功率为 5000 MW,单阀组闭锁造成 1250 MW 过剩功率,切黄登两台机共 980 MW,频率短时仍达到 50.53 Hz,最终在 FLC 作用下频率恢复到死区范围内,直流最终输送功率保持在 4200 MW,系统稳定。

4 实验验证

对直流孤岛频率的 FLC 功能进行了测试,试验工况如下。双极低阀 1000 MW 运行,通过在直流极控程序中置数,将新松站母线频率叠加+0.2 Hz,持续时间 500 ms 的正阶跃量,得到的波形如图 10 所示。由图 10 可见叠加 0.2 Hz 的频差后,FLC 调制输出量达到 37.49 MW,RTDS 试验与现场调试输出量

一致,图 10 中仿真与现场的频率曲线存在差异,原因在于现场调试时新松站母线频率偏低。

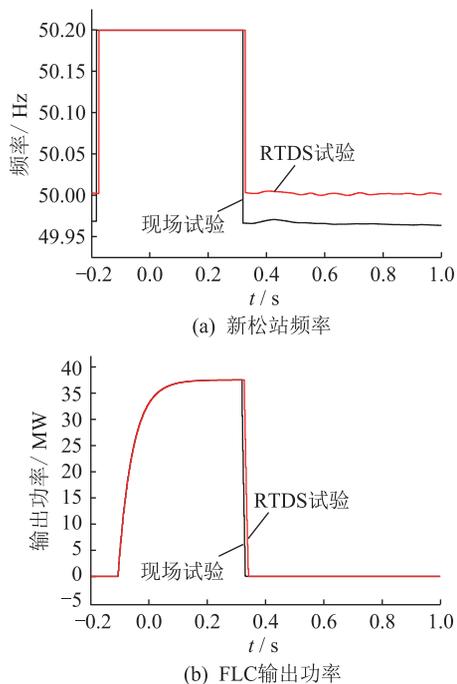


图 10 现场实验与 RTDS 仿真波形对比
Fig.10 Comparison between field experiment and RTDS simulation

5 结语

孤岛方式下对于引起送端系统交流功率大的不平衡扰动,FLC 能够发挥其调节迅速、灵活、精度高的作用,对系统扰动后稳定起到积极作用。孤岛方式下滇西北直流送端自动投入 FLC,联网方式下,考虑异步之后云南电网频率特点,为防止 FLC 频繁动作,建议联网方式下频率死区放大至 0.15 Hz。由于送端 FLC 与受端 FLC 调制冲突,实际运行中建议退出受端 FLC 功能。

本文分析了滇西北直流和金中直流两种 FLC 控制逻辑,通过仿真对照试验,表明滇西北直流 FLC 调节更灵敏。结合典型的故障工况对 FLC 的调制效果进行了验证,仿真结果表明在送端系统出现机组跳闸、直流阀组故障情况下,滇西北 FLC 能快速调节恢复平衡。本文的研究成果为滇西北运行控制策略提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 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(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(24):22-25.
[2] 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 Weimin, YIN Weiyang, et al. Island operation modes XS800 UHVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(1):185-189.
[3] 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):96-102,13.
CHEN Yiping, CHENG Zhe, ZHANG Kun, et al. Frequency regulation strategy for islanding operation of HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(4):96-102,13.
[4] 贾旭东,郭 琦,韩伟强,等. 孤岛方式下云广直流自动功率调整功能与小湾电厂 AGC 配合的仿真[J]. 南方电网技术,2011,5(3):6-9.
JIA Xudong, GUO Qi, HAN Weiqiang, et al. Simulation on the coordination of automatic power adjustment function of islanding Yunnan-Guangdong DC system with the AGC in Xiaowan Power Plant[J]. Southern Power System Technology, 2011,5(3):6-9.
[5] 高 扬,艾 芊,刁晓伟,等. 柔性多端直流的智能分布调控[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):120-124.
GAO Yang, AI Qian, DIAO Xiaowei, et al. Intelligent distributed control for flexible multi-terminal DC network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(11):120-124.
[6] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010.
LI Xingyuan. HVDC transmission system[M]. Beijing:Science Press,2010.
[7] 李晓黎,陈祖胜. 特高压直流输电技术发展综述[J]. 广西电力,2009,32(1):23-26.
LI Xiaoli, CHEN Zusheng. Summary of ultrahigh voltage direct current transmission technology[J]. Guang Xi Electric Power, 2009,32(1):23-26.
[8] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
XU Zheng, CHEN Shousun, Zhang Baolin. Theory and analysis of dynamic power system [M]. Beijing :Tsinghua University Press,2002.
[9] KUNDER P. Power system stability and control [M]. New York; McGraw-Hill, 1994, 11-21.
[10] POVH D. Use of HVDC and FACTS[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(2):235-245.
[11] 杨卫东,薛禹胜,荆 勇,等. 南方电网中直流输电系统对交流系统的紧急功率支援[J]. 电力系统自动化,2003,27(17):68-72.
YANG Weidong, XUE Yushen, JIN Yong, et al. Emergency DC power support to AC power system in the South China Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17):68-72.
[12] 赵 睿,刘 蔚,涂 亮,等. 金中直流调制对送端电网稳定性影响的研究[J]. 广西电力,2016,39(6):1-6,11.
ZHAO Rui, LIU Wei, TU Liang, et al. Research on influence of Jin-Zhong HVDC modulation on stability of sending and receiving sides of power grid [J]. Guang Xi Electric Power, 2016,39(6):1-6,11.

- [13] 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.
- [14] 涂亮,柳勇军.糯扎渡直流协调控制系统设计及效果[J].南方电网技术,2011,5(S2):11-11.
TU Liang,LIU Yongjun. The design and effect of coordinated control system for Nuozhadu DC project[J]. Southern Power System Technology,2011,5(S2):11-11.
- [15] 梅勇,周剑,吕耀棠,等.直流频率限制控制(FLC)功能在云南异步联网中的应用[J].中国电力,2017,50(10):64-70.
MEI Yong,ZHOU Jian,LYU Yaotang,et al. Study on application of HVDC frequency limit control in asynchronously interconnected Yunnan Grid [J]. Electric Power,2017,50(10):64-70.
- [16] 南方电网科学研究院.滇西北至广东±800 kV特高压直流输电工程直流调制研究[R].广州:南方电网科学研究院,2017.
Electric Power Research Institute, CSG. Study on DC modulation of DXB800 UHVDC system [R]. Guangzhou: Southern Power Grid Research Institute, CSG,2017.
- [17] 李战鹰,韩伟强,黄立滨.云广孤岛运行方式RTDS试验平台的构建及研究[J].南方电网技术,2010,4(2):47-51.
LI Zhanying,HAN Weiqiang,HUANG Libin. Construction and analysis of the RTDS testing platform for the islanding operation of Yunnan-Guangdong UHVD system[J]. Southern Power System Technology,2010,4(2):47-51.
- [18] 廖梦君,郭琦,李鹏,等.基于RTDS的云南电网与南方电网主网异步联网运行控制特性分析[J].南方电网技术,2016,(07):40-44.
LIAO Mengjun,GUO Qi,LI Peng,et al. RTDS based analysis on operation-control characteristics of asynchronously interconnected Yunnan Power Grid and main grid of China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology,2016,(07):40-44.
- [19] 郭琦,韩伟强,饶宏,等.高肇直流"07·1·15"故障的RTDS仿真对比研究[J].南方电网技术,2008,2(2):62-66.
GUO Qi,HAN Weiqiang,RAO Hong,et al. Research on '07·1·15' DC line fault of Gui-Guang HVDC compared with RTDS simulation [J]. Southern Power System Technology,2008,2(2):62-66.

作者简介:



张力飞

张力飞(1992—),男,硕士,从事直流运行与控制技术研究工作(E-mail:zhanglifen@csg.cn);

郭琦(1979—),男,博士,高级工程师(教授级),从事电网仿真和高压直流控制保护相关工作。(E-mail:guoqi@csg.cn);

夏成军(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统分析运行与控制、高压直流输电和柔性直流输电。

Frequency Limitation Control and Engineering Application in DXB UHVDC Transmission System

ZHANG Lifen^{1,2}, GUO Qi^{1,2}, XIA Chengjun³, OU Kaijian^{1,2}, LI Shuyong^{1,2}, ZHU Yihua^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd.), Guangzhou 510663, China; 2. CSG Key Laboratory for Power System Simulation, Guangzhou 510663, China; 3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: As a kind of important means for DC frequency stability, frequency limit controller has been used widely in HVDC projects. DXB UHVDC project is faced with the problems of increasing frequency instability of the Yunnan power grid, as it runs asynchronously from the main grid, and the shortage of the opening unit in the initial stage of production. The configuration of FLC is very important. It analyzes two kinds of FLC control logic used in current DC project of China Southern Power Grid and compares the results of two kinds of control logic response through simulation test. The FLC configuration and parameter selection of DXB UHVDC are explained, and the response characteristics of FLC under the typical fault under the isolated island system are verified through simulation. And verify its function in DXB RTDS simulation platform as well as field test.

Key words: DC project; islanded operation; frequency stabilization; RTDS; frequency limitation control (FLC)

(编辑 钱悦)