

云南电网异步联网直流单极闭锁频率稳定分析

孟贤¹, 柳勇军², 涂亮², 付超², 吴小珊², 赵睿²

(1. 云南电网电力科学研究院有限责任公司, 昆明 650217; 2. 南方电网电力科学研究院, 广州 510080)

摘要: 在云南电网与南方电网异步运行的情况下, 云南电网的运行特性已发生重大变化, 同时因直流故障引发的系统高频问题将成为一个主要的关注重点。通过对普侨直流故障再启动到单极闭锁过程的研究, 考虑极间功率转移、直流频率限制控制及稳定控制措施, 对故障情况下系统频率响应进行分析。在此基础上, 利用离线数据仿真重现故障过程, 并对比不同控制措施的有效性, 确定在故障过程中各措施对频率稳定的影响。

关键词: 异步联网; 直流故障; 频率特性; 频率限制; 仿真分析

Analysis of Puqiao HVDC Mono-polar Blocking Along with Frequency Stability Under Asynchronous Operation of Yunnan Power Grid

MENG Xian¹, LIU Yongjun², TU Liang², FU Chao², WU Xiaoshan², ZHAO Rui²

(1. Electric Power Research Institute, YNPG, Kunming 650217, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Under the circumstance of Yunnan Power Grid asynchronized with China Southern Power Grid, the operational character of Yunnan power grid has been changed drastically, meanwhile, system over frequency problem has becoming a current concern. Researching through recovery and blockprocess of Puqiao HVDC which takes inter-polar power transfer、HVDC frequency limit control and stability control into accountenables an analysis towards system frequency response under a fault occurring situation. By applying offline simulation to recreate such process and make comparison of the effectiveness for different frequency controllingmethods, it clarifies impacts for frequency stability under different measures that taking part in fault situation.

Key words: asynchronous interconnection; HVDC malfunction; frequency character; frequency limitation; simulation

中图分类号: TM74 文献标识码: B 文章编号: 1006-7345 (2018) 04-0004-05

0 前言

2016 年云南电网与主网异步, 云南电网通过四回送广东直流、两回送广西直流以及鲁西背靠背工程实现了与主网的交流去耦合运行^[1]; 通过直流相连的系统不仅解决了云南与主网的低频振荡问题以及广东电网受端严重故障导致多回直流持续换相失败的系统失稳问题, 同时预控了由于多回直流故障或稳控装置拒动带来大规模功率向交流通道转移而带来的系统失稳风险。

然而, 在云南电网与主网异步运行的同时, 由于云南电网系统容量减小, 水电装机容量增大, 云南电网在受到扰动后的频率问题将日显突出^[2], 特别是直流故障后带来的频率问题将成为主要关注点。

本文以一次实际普侨直流线路故障后直流再启动不成功闭锁过程为例, 分析系统频率响应、直流 FLC、稳控切机情况, 并通过 BPA 仿真复现故障状态, 模拟故障过程中不同功能逻辑作用, 并研究在不同协调控制措施的前提下直流故障对云南系统频率造成的影响。

1 事件简介

普侨直流首端落点位于云南电网西南侧, 通过一回 ± 800 kV 直流线路送广东侨乡, 额定容量为 5 000 MW, 送端网架结构如图 1 所示, 其中云南普洱换流站与配套糯扎渡电厂通过 3 回 500 kV 交流线路相连, 送广东侨乡换流站, 同时潮流可通过 500 kV 普洱至思茅双回线外送 500 kV 墨江站及 500 kV 通宝站。

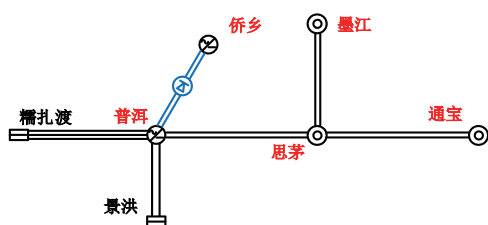


图1 普侨直流云南电网结构示意图

故障前云南电网统调负荷为 15 163 MW，统调发电为 26 700 MW，火电出力约为 1 800 MW，水电出力约 24 000 MW，云南送广西 2 400 MW，送广东 8 600 MW；系统潮流走势为滇西北小水电、滇西南大水电以及滇东北火电的发电集中区域向滇中、滇南以及滇东的负荷集中区域供电。

2 事件分析

事件过程中，普侨直流极一线路持续故障，故障再启动不成功导致直流单极闭锁，同时极二转入过负荷运行。

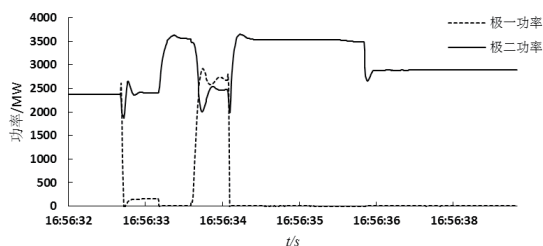


图2 普侨直流功率变化

结合上图普侨直流双极的实际功率变化曲线，可知故障过程中普侨直流功率变化主要包含涉及过负荷能力的极间功率转移，单极闭锁故障极再启动以及闭锁信号发出后极二功率调整三个阶段^[3-4]，实际系统频率变化将主要随普侨直流功率变化及 FLC 和稳控动作切机而相应变化。

普侨直流双极安排运行功率 4 700 MW，当极一发生直流线路故障后，其功率迅速下降至零，进入极间功率转移阶段，并开始尝试进行第一次再启动，而极二转移过剩功率，达到 3 510 MW 的 1.4 倍过负荷运行，过程持续约 0.5 s。

再启动阶段阶段，极一再启动功率恢复，同时极二由过负荷运行降至原额定运行功率，但由于故障依然存在，再启动失败，约 0.5 s 后，极一闭锁，稳控切机 1 200 MW，此时直流转入

单极运行模式，因系统存在过剩功率，极二根据过负荷逻辑安排运行。

极二过负荷运行过程中，先升至 1.4 倍暂时过负荷运行，持续 2 s，而后降至 1.16 倍长期过负荷运行，功率保持在 2 900 MW，过剩功率通过其余直流线路转移。

事故前稳控系统运行正常，闭锁命令发出后计算切机量为：

$$D_p = K_{21_nn} \times (P_{DC1} - P_{ser21_nn}) \quad (1)$$

式中： K_{21_nn} 为切机动作系数，整定值为 1； P_{DC1} 为单极闭锁前所有故障阀组的功率和； P_{ser21_nn} 为切机定值，整定值为 1 500 MW。

普侨直流单极闭锁后过剩功率 2 350 MW，超过稳控启动门槛值 1 600 MW^[5]，安稳策略设计按照最小过切原则采取切机措施；普侨直流单极闭锁后，发送切机命令至糯扎渡电厂（不足部分发至云南墨江主站切除景洪、大盈江等机组），糯扎渡电厂稳控装置在接收到普洱站的切机命令后，在保留 G_n （联网 $G_n=1$ ）台机组的基础上，切除糯扎渡电厂 #2、#5 机共 1 200 MW。

系统过剩功率为 600 MW（普侨双极运行功率 4 700 MW- 单极 1.16 倍过负荷运行功率 2 900 MW- 稳控切机量 1 200 MW），后续由系统一次调频和 AGC 调整。

3 频率响应分析

系统实际直流外送功率为 11 000 MW，具体直流运行情况及 FLC 上调容量如表 1 所示，FLC 下调容量均按额定容量的 50% 考虑；同时逆变侧直流 FLC 功能均退出。

表1 直流运行功率及FLC上调容量

云南直流	楚雄	普侨	牛从	金中	鲁西	永富	总计
功率(MW)	2 000	4 700	1 900	1 500	900	0	11 000
FLC上调容量(MW)	1 000	0	960	640	200	0	2 800
死区(Hz)	0.15	0.15	0.14	0.14	0.14	/	/

从上表看出，除永富直流停运，其余直流均正常运行，其中普侨直流额定容量为 5 000 MW，实际运行功率为 4 700 MW，同时由于过负荷限制其 FLC 无上调容量。

根据第二节描述的直流故障过程，以及故障后短时间内稳控切机以及 FLC 响应^[6]系统频

率输出带来的频率变化,系统实际频率响应曲线如图3所示。

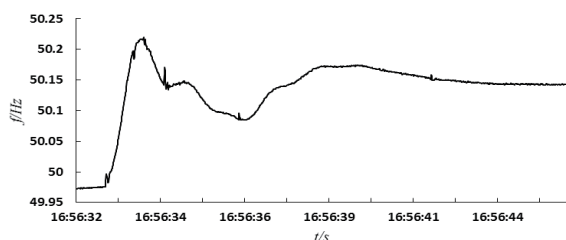


图3 系统频率变化

系统稳定运行频率为49.97 Hz,在极一发生故障后,由于系统出现剩余功率,系统频率开始逐渐上升,当频率上升到50.15 Hz后,其余直流在0.1 s-0.15 s相继启动 FLC 上调功能,于此同时,极二已进入第一次1.4倍过负荷运行,系统频率上升速度明显降低,至直流 FLC 调制量达到最大值时,系统频率达到最大值50.21 Hz。

系统频率超过系统频率达到最大值后开始缓慢下降,FLC 调制量下降,普侨直流再启动过程中,系统频率降至50.14 Hz,极一闭锁,安稳装置动作切糯扎渡#2、#5机共1200 MW,系统频率下降趋势减缓,至普侨直流极二运行功率降至1.16倍过负荷长期运行,系统频率又出现小幅上升,直至超过 FLC 调节死区,FLC 再次启动参与系统频率调节,系统频率达到最大值50.17 Hz,后缓慢下降并稳定在50.13 Hz。各直流 FLC 调制输出量如下图4所示。

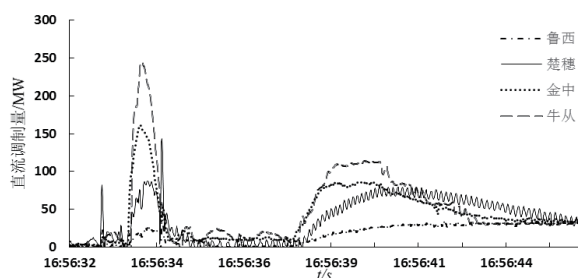


图4 FLC调制输出量

可以看出,实际直流 FLC 受直流控制系统影响以及本地频率变化量差异会产生不同的响应输出曲线。在稳控切机等待直流再启动的过程当中,FLC 快速调制转移过剩功率可以很好的起到抑制系统频率上升的作用。

4 仿真验证

下面采用中国电科院 PSD-BPA 软件对该

故障进行仿真重现,以故障前云南电网运行潮流数据为基础,负荷模型为50%电动机负荷和50%恒阻抗负荷,发电机为考虑阻尼绕组的双轴模型,水电机组调速器转速调节死区按照装机20 MW以上的机组死区0.05 Hz,20 MW以下的机组为0.1 Hz,火电机组调速器转速调节死区为0.033 Hz,机组阻尼系数为零。

仿真中云南直流运行功率及 FLC 参照表1进行配置,省内发电、负荷以及大型机组出力参照实际运行工况。故障模拟实际普侨直流故障功率转移过程,其直流功率变化如图5所示。

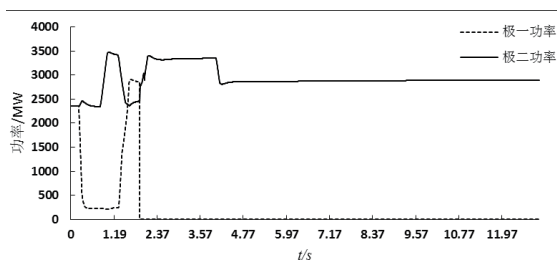


图5 仿真普侨直流功率变化

对比图2,直流双极功率转移基本一致,极二功率限制在自身过负荷能力允许范围内并在稳定后保持长时间过负荷运行;稳控装置切机参照实际情况在极一闭锁0.1 s后切除糯扎渡电厂#2、#5共1200 MW,系统频率响应如下图6所示。

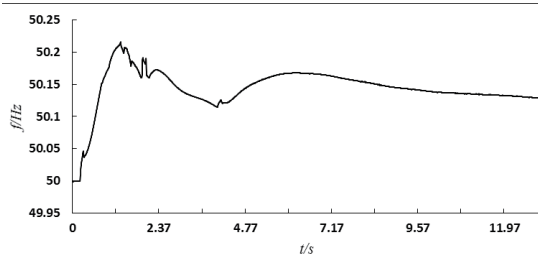


图6 仿真频率变化

仿真曲线上可以看出系统频率在约1.3 s达到最大值50.21 Hz,暂态频率在考虑频率控制主要措施的前提下被有效的控制在实际系统响应频率附近,后续在各方协调控制下系统频率最终趋于稳定。

各直流在故障过程中 FLC 调制输出曲线如图7所示。

FLC 调制量在仿真开始1.4 s时刻达到第一次峰值,在6.8 s时刻达到第二次峰值,仿真 FLC 调制时间响应与实际系统基本一致,仿真

对比第一次 FLC 调制量和第二次调制量峰值, 其结果所示, 仿真 FLC 调制量与实际系统 FLC 基本一致, 但第二次调制输出有所差异, 综合考虑系统初始频率差异以及第二次 FLC 调制系统频率靠近死区, 仿真 FLC 模型与实际系统响应偏差, 对于系统频率不存在较大影响^[5]。

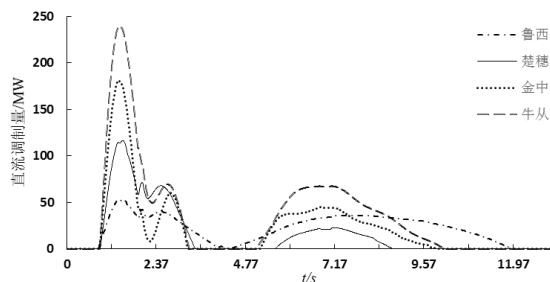


图7 仿真FLC调制输出量

5 主要频率控制措施研究

在第四节仿真验证保证模型对频率响应准确度的基础上, 对各频率控制主要措施进行对比、组合和分析, 考虑普侨直流故障在不同措施下系统频率的响应, 措施定义如下:

0: 普侨直流极间功率转移

I: 稳控装置切机

II: 现有直流 FLC 功能

其中无措施为在普侨直流极一故障再启动失败后闭锁的过程中除机组固有的一次调频外, 不额外采取任何功率、频率控制措施, 根据以上仿真结果可知:

1) 在无控制措施的情况下, 系统频率最高达到 51 Hz, 可能导致云南电网高周第二轮动作, 同时系统频率超过 50.15 Hz 的时间达 20.34 s, 而相比于稳控动作, 高周切机响应时间过长, 暂态频率过高, 不利于系统频率稳定, 因此对于功率过剩 (超过 1 600 MW) 问题, 稳控切机响应时间短, 对于控制系统频率将有良好的效果。同时, 系统频率超过 50.15 Hz 后直流 FLC 可在频率超过死区范围后持续动作, 从而保证频率稳定, 所以系统调频主要手段应包含稳控切机和直流 FLC。

2) 通过 2、3、4 与 5 的对比可以看出, 极间功率转移对抑制系统暂态频率有一定的效果, 其响应时间最快, 但受过载能力限制, 功率转移量相对较小; 在减少系统频率超过 50.15 Hz

的时间上, 可以看出稳控切机和直流 FLC 功能改善效果相差不大, 但稳控切机或直流 FLC 独立效果将相对优于极间功率转移。通过极间功率转移配合稳控切机及直流 FLC 将更为有效和快速地抑制系统过高频率。

3) 极间功率转移属于直流附加控制, 对于具有过载运行能力的直流系统, 当直流发生单极闭锁时, 利用过负荷能力吸收另一极部分剩余功率可以减少功率向系统转移; 直流 FLC 响应则通过检测系统频率从而控制直流功率输出, 当系统功率过剩造成系统频率上升超过 FLC 死区后进行调整, 响应时间将相对落后于极间功率转移; 而现有直流稳控系统未考虑极间功率转移以及直流 FLC 对减少系统冗余功率的效果, 造成机组过切。通过增加极间功率转移量作为稳控计算切机量的参考值, 同时由 FLC 转移剩余功率, 将可以成为直流单极闭锁稳控策略优化的一个方向进行研究。

6 结束语

云南异步联网后, 直流故障带来的高频问题值得关注。本文针对具体普侨直流单极闭锁过程进行了详细分析, 主要从直流 FLC、稳控切机和极间功率转移措施入手, 通过仿真复现故障过程, 然后对主要的频率控制措施进行了深入地研究, 对比各个功能及其组合的效果对系统频率稳定的改善效果, 为今后云南直流闭锁频率稳定问题提供可参考的建议, 完善频率措施控制逻辑。

参考文献

- [1] 中国南方电网有限责任公司. 中国南方电网2017年运行方式[R]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2016.
- [2] 蔡葆锐, 王兴刚, 司大军, 等. 异步联网对云南电网安全稳定性的影响[J]. 云南电力技术, 2015, 43(1): 83-86.
- [3] 洪潮. 云广特高压直流孤岛运行方式下单极闭锁故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1801-1807.
- [4] 涂亮, 柳勇军, 付超, 等. 牛从直流线路再启动对系统稳定的影响及控制策略[J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 50-55.
- [5] 南方电网科学研究院. 2017年南方电网主网安稳策略滚动研究[R]. 广州: 南方电网科学研究院, 2016.
- [6] 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.
- [7] 周保荣, 洪潮, 金小明, 等. 南方电网同步运行网架向异步运行网架的转变研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2084-2092.
- [8] 张东辉, 洪潮, 周保荣, 等. 云南电网与南方电网主网异步

- 联网系统方案研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 1-6
- [9] 周磊, 张丹, 刘福锁, 等. 异步联网后云南电网的频率特性及高周切机方案[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 17-23.
- [10] 刘洪涛, 李建设, 苏寅生, 等. 云广 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程控制系统的特点[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2): 35-38.
- [11] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [12] 汤勇, 卜广全, 侯俊贤. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[M]. 2.0版. 北京: 中国电力科学研究院系统所, 2006.
- [13] 杨浚文, 吴琛, 黄伟, 等. 异步联网后多回直流对云南电网的影响[J]. 云南电力技术, 2017, 45(1): 132-135

收稿日期: 2017-07-28

作者简介:

孟贤(1980), 男, 硕士, 工程师, 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 从事系统分析、直流输电方面工作(e-mail) fzx4939@163.com;

柳勇军(1978), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统安全稳定控制方面工作(e-mail) liuyj@csg.cn;

涂亮(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统安全稳定控制方面工作(e-mail) tuliang@csg.cn.

(上接第3页)

7) 系统现在针对每台机组每次的免考确定速度过于慢, 基本需要 30 s 左右才能完成一次人工免考, 加之马上又要针对新能源并网的考核, 届时可能出现系统运行更慢的状况, 建议系统进行完善优化, 提高运行速度;

8) 异步运行以来火电机组出现了大量的不合格结果, 但从电厂反馈上来的监控数据上分析确实有正确的动作, 建议开放考核计算的具体过程, 每一次考核不合格的结果均能看到原始的频率、功率曲线、积分窗口的选取、积分电量的计算等, 以对比电厂反馈的实际曲线, 这样才能发现调频不合格的真正原因;

9) 大型水电机组调慢了调频速度, 是为了增加异步运行的频率稳定性, 因为其额定功率大, 水锤效应明显, 且机组集中, 对电网影响大。为了提高中小水电的调频特性, 可以考虑将中小水电的调速器参数调频速度调快一些, 比如增加 k_p 、 k_i , 减小 b_p 值, 改普通型为增强型等措施, 因中小水电容量不大, 分布较广, 对电网频率影响应该不大, 可行性还需仿真分析验证。

参考文献

- [1] 关于印发《南方区域并网发电厂辅助服务管理实施细则(修订稿)》及《南方区域发电厂并网运行管理实施细则

(修订稿)》的通知(南方监能市场[2015]118号)

- [2] 李阳坡, 龙云, 王坚. 南方电网发电机组一次调频性能评价方法与改进. 2010年南方电网技术论坛, 2010.
- [3] 文学, 张昆. 南方电网一次调频现状研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 70-72
- [4] 何常胜, 舒荣, 刘兴福, 董鸿魁, 吴永智. 水电站机组一次调频与AGC性能优化. 云南电力技术, 2014,(1):106-109
- [5] 周振辉. 水电机组一次调频考核案例的解析. 云南电力技术, 2014,(5):123-125
- [6] Hesien Liu, Lin Zhu, Zhuohong Pan, Feifei Bai, Yong Liu, Yilu Liu, Mahendra Patel, Evangelos Farantatos, Navin Bhatt. "ARMAX-based Transfer Function Model Identification Using Wide-area Measurement for Adaptive and Coordinated Damping Control", IEEE Trans. Smart Grid, 2015, to appear.
- [7] Hesien Liu, Hengchu Shi, Xianliang Teng, Fei Yuan. "Hydro-thermal AGC Generators Coordinated Optimization Control Strategy in Yunnan Power Grid", Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(20): 95-99
- [8] Jinsong Liu, Xiaolu Li, Dong Liu, Hesien Liu, Peng Mao. "Study on Data Management of Fundamental Model in Control Center for Smart Grid Operation", IEEE Trans. Smart Grid, 2011/12, 2(4): 573-579

收稿日期: 2017-04-22

作者简介:

张杰(1978), 男, 工学硕士, 高工, 云南电力调度控制中心, 从事电力系统分析与控制方面的工作(Email) jimhorse1978@163.com。

吴琛(1974), 女, 教授级高级工程师, 云南电力调度控制中心, 主要从事电力系统分析与运行管理。

黄伟(1979), 男, 博士, 高工, 云南电力调度控制中心, 主要从事电力系统分析与运行管理。

《云南电力技术》网上投稿页面: <http://yndljs.cnjournals.cn>。欢迎广大读者通过“作者登陆”投稿!