

DOI: 10.7667/PSPC170494

异步联网后西南电网安全稳定特性分析

陈刚¹, 丁理杰¹, 李旻², 史华勃¹, 张宇栋³, 李甘²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;
3. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610041)

摘要: 针对渝鄂背靠背柔性直流工程投运后, 与两华电网异步联网运行条件下的西南电网进行计算分析。研究了异步联网后西南电网小干扰稳定、功角稳定及频率稳定等稳定特性的变化情况。结果表明, 渝鄂背靠背背后, 西南电网小干扰特性变化, 尖山近区故障激发弱阻尼振荡成为限制水电通道送出能力的新制约因素。暂态功角稳定性有所提升, 不再成为限制川电外送的主要制约因素。频率稳定问题突出, 且存在严重的由于水电机组负阻尼效应导致的超低频振荡风险。最后, 针对上述风险提出了相应的建议与措施。研究结论对西南电网异步联网后的安全稳定运行提供一定的技术参考。

关键词: 西南电网; 异步联网; 安全稳定; 小干扰稳定; 频率稳定; 超低频振荡

Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection

CHEN Gang¹, DING Lijie¹, LI Min², SHI Huabo¹, ZHANG Yudong³, LI Gan²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 3. Southwest China Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Southwest China Power Grid which is un-synchronized interconnection with Central-North China Power Grid is calculated and analyzed after the commissioning of back to back VSC-HVDC between Chongqing and Hubei power grid. The operation characteristic of Southwest China power grid after asynchronous interconnection is studied, including small signal stability, rotor angle stability, and frequency stability. Results show that with Chongqing and Hubei back to back commissioning small signal stability varies and the weekly damped oscillation excited by faults around Jianshan substation becomes to be new constraint of sending of hydropower. Transient rotor angle stability is improved and is no longer the main factor to restrict the power transmission. It should be noted that frequency stability problem is prominent, and there is a serious risk of ultra-low frequency oscillation due to the negative damping of hydro generators. Finally, corresponding suggestions and measures are put forward for the above risks. The study could be technical reference for the planning and operation of the Southwest Power Grid.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Study on source-grid collaboration frequency control technology for large-scale energy bases with multi-DC and AC/DC transmission systems".

Key words: Southwest China Power Grid; asynchronous interconnection; security and stability; small disturbance stability; frequency stability; ultra-low frequency oscillation

0 引言

以川渝电网为主体的西南电网通过渝鄂断面与华中主网相联, 并进一步通过长南荆单回特高压交流联接华北电网, 形成华中—华北近似长链型交流同步电网。研究表明, 与长南荆特高压电气距离最远的四川电网发生某些严重故障时, 将会引起川渝、

渝鄂、特高压交流联络线出现大幅度功率振荡, 严重时导致渝鄂、特高压通道解列, 威胁系统安全稳定运行, 限制西南地区富余水电外送^[1-3]。

特高压直流输电是实现清洁能源的跨区供应, 治理中东部雾霾的核心手段之一。为实现水电清洁能源的大规模外送, 西南电网陆续投运了±800 kV锦苏直流、±800 kV复奉直流以及±800 kV宾金直流共计三回特高压直流, 与华东电网异步互联, “十三五”期间还将投产第四条特高压直流^[4]。随着特高压直流的建设, 电网强弱弱交特性愈发明显, 受

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“大型能源基地多直流、交直流送出系统网源协同频率稳定控制技术研究”

端故障引发直流换相失败进而造成送端稳定破坏成为影响送端交流电网稳定运行的主要威胁^[5-6]。目前, 川渝、渝鄂、长南荆特高压交流断面输电能力均受限于直流故障引发的功率波动。

为彻底解决西南电网扰动及直流故障对华中—华北主网的冲击, 提高电网运行的灵活性和断面输电能力, 国网公司规划建设±400 kV、5 000 MW 渝鄂背靠背柔性直流输电工程, 将渝鄂交流断面通过柔直互联^[7]。异步联网后西南电网装机仅为原两华电网的1/5, 电网高水电占比、大机小网和强直弱交等特征愈发明显, 同时面临热稳、动稳、功角稳定、电压稳定和频率稳定等一系列安全稳定风险, 国内外缺乏运行如此高风险电网的相关经验, 给电网生产运行带来新的挑战。

本文从潮流和稳定等方面, 研究渝鄂背靠背西南电网的安全稳定特性, 提出提高安全稳定水平的措施。研究结果对西南电网规划、运行及国内同类直流工程的设计具有一定的参考意义。

1 西南电网结构

2018年, 西南电网主要 500 kV 网架示意图如图 1 所示。渝鄂背靠背投运后, 西南电网通过背靠背柔直南北通道与华中电网异步互联。除此之外, 通过锦苏、复奉、宾金三回特高压直流与华东电网互联, 通过青藏、德宝直流与西北电网互联。西南电网内部, 四川电网通过川渝断面六回 500 kV 交流线路与重庆电网相联, 藏中联网工程投运后, 四川电网通过两回 500 kV 交流线路与西藏电网相联。四川水电清洁能源分布在川西南偏远地区, 集中开发后通过攀西、瀑布沟、九石雅、康甘、茂县五大水电通道送出。

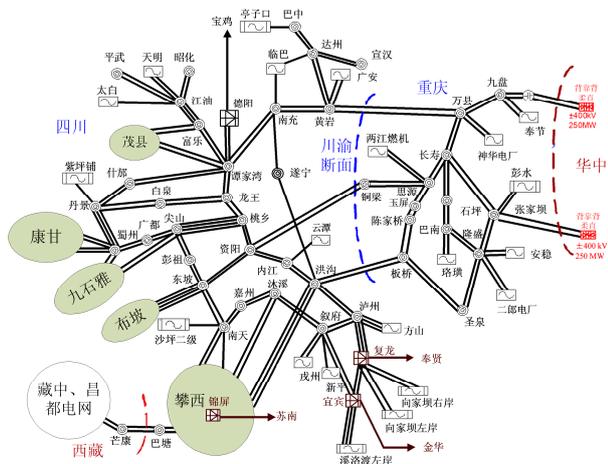


图 1 西南电网结构示意图

Fig. 1 Sketch of Southwest China Power Grid

2 系统模型和安全稳定研究条件

以渝鄂背靠背投产的 2018 年为计算水平年, 采用 PSASP 程序建立了交直流系统机电暂态仿真模型, 通过潮流及暂态稳定程序进行计算分析^[8]。

2.1 发电机模型

除少数藏中电网机组采用 6 阶详细模型外, 西南电网发电机均采用考虑 E'_q 、 E'_d 、 E'_q 电势的 5 阶模型, 并考虑励磁、PSS 以及调速器的作用。

2.2 负荷模型

稳定计算采用感应电动机和恒阻抗的综合负荷模型。四川电网负荷比例为 40% 感应电动机负荷+60% 恒阻抗负荷; 重庆电网负荷比例为 40% 感应电动机负荷+60% 恒阻抗负荷; 藏中电网负荷比例为 30% 感应电动机负荷+70% 恒阻抗负荷。均不考虑负荷频率调节效应。

2.3 稳定判据及准则

本文考虑系统的功角、电压和频率均稳定则系统稳定。

1) 功角稳定判据: 故障清除后同步系统中任意两台机组相对功角摇摆不失步且呈减幅振荡。

2) 电压稳定判据: 故障清除后负荷母线电压能在 10 s 内恢复至 0.80 p.u. 以上。中长期电压能保持或恢复到 0.9 p.u. 以上。

3) 频率稳定判据: 系统切机、切负荷措施后系统频率不触发第三道防线(50 ± 1) Hz, 并能恢复到正常范围(50 ± 0.5) Hz^[9-13]。

3 安全稳定分析

3.1 潮流计算结果

针对不同的研究目标, 考虑丰水期大、小、极小三种方式, 丰水期三大特高压直流均满功率外送, 德宝直流按零功率考虑。西南电网负荷: 丰大 47 000 MW、丰小 26 500 MW、丰极小 21 500 MW, 各方式下主要断面功率如表 1 所示。

表 1 典型方式下主要断面功率

Table 1 Transmission power of important section under the typical load flow

	MW						
方式	渝鄂	川渝	茂县	康甘	九石雅	布坡	攀西
丰大	5 000	6 500	3 000	4 800	5 000	5 000	7 900
丰小	2 000	6 500	2 000	4 200	4 000	4 000	6 200
丰极小	2 000	6 500	2 000	3 200	4 600	4 000	6 200

四川富余水电穿越四川主网后, 除通过特高压直流送出至华东电网外, 主要通过川渝断面经重庆电网送至华中电网。大方式下, 受万盘、盘龙线路

$N-1$ 热稳限制, 柔直北通道不能超 1 750 MW; 受张恩线路 $N-1$ 热稳限制, 柔直南通道不能超 2 100 MW。故在当前网架下, 重庆电网无法支撑 5 000 MW 四川水电穿越, 需要对张恩、盘龙线路进行增容改造, 并加快万县至九盘 500 kV 第三回线工程建设。

3.2 小干扰稳定分析

丰大方式下, 小干扰分析得到西南电网主要振荡模式如表 2 所示。

表 2 小干扰分析结果

Table 2 Simulation results of small signal stability

模式	频率/Hz	阻尼/%	说明
川—渝	0.78	14.1	强阻尼
川渝—西藏	0.66	9.10	藏中送出 0 MW
	0.64	7.30	藏中送出 500 MW
川西—川南	0.71	9.10	九石雅+康甘 8 500 MW, 攀西 7 900 MW
	0.64	3.70	九石雅+康甘 10 500 MW, 攀西 10 000 MW

计算结果表明, 渝鄂背靠背投运后, 原川渝—华中振荡模式不复存在, 川渝机组也不再参与华中—华北振荡模式。2017 年川渝 500 kV 第三通道投运, 川渝电网间联系更为紧密, 川渝间呈现强阻尼。

藏中联工程投运后, 藏中电网通过 1 000 km 以上 500 kV 双回线路与川渝电网相联, 出现川渝—西藏振荡模式, 且该模式阻尼水平与藏中外送功率强相关。

九石雅、康甘以及攀西水电通道大功率外送时, 川西—川南振荡模式阻尼降低, 成为限制水电送出的新制约因素。

3.3 水电通道送出能力分析 & 提升措施

3.3.1 能力分析

根据分析, 得到各水电通道自身送出能力: 九石雅+康甘 10 500 MW、攀西 10 000 MW、茂县及布坡通道送出能力满足需求。安排各水电通道按照极限能力运行(方式一), 对全网进行 $N-2$ 校核, 结果表明, 尖山近区 $N-2$ 故障会导致系统动态失稳, 如图 2 所示。

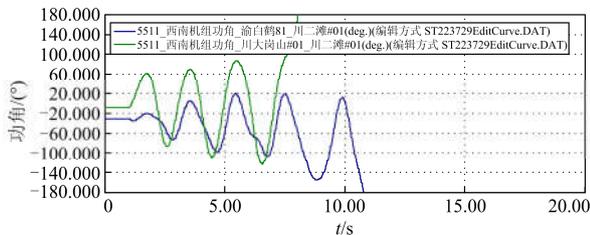


图 2 尖山—彭祖 $N-2$ 仿真结果(方式一)

Fig. 2 Simulation results of $N-2$ fault on line Jianshan-Pengzu (Operation point 1)

对图 2 曲线进行 Prony 分析, 主导模式频率约为 0.5 Hz, 阻尼比为-3.8%。分析可知, 该模式为表 2 中川西—川南振荡模式, 即当水电通道大功率外送时, 尖山近区 $N-2$ 故障打破了四川电网梯格性网架, 使得川西—川南间联系减弱, 电气距离增大, 激发负阻尼振荡。限制九石雅、康甘整体送出功率在 980 万 kW 以下时(方式二), 系统可保持稳定, 仿真结果如图 3 所示。

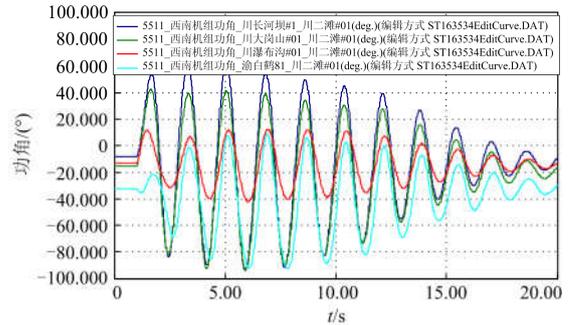


图 3 尖山—彭祖 $N-2$ 仿真结果(方式二)

Fig. 3 Simulation results of $N-2$ fault on line Jianshan-Pengzu (Operation point 2)

3.3.2 送出能力提升措施

为提升水电通道送出能力, 可从两方面入手:

- 1) 优化 PSS 参数, 提升川西—川南振荡模式阻尼;
- 2) 补强网架结构, 加强川西—川南间电气联系。

计算结果表明, 优化大岗山机组 PSS 参数可提升九石雅+康甘送出能力约 20 万 kW; 新建 500 kV 雅安—资阳双回线可提升九石雅+康甘通道送出能力约 250 万 kW, 且不再受动稳限制。

3.4 频率稳定

渝鄂背靠背隔断了西南电网与两华电网的交流电气联系, 原川—渝—鄂—特高压交流长链式同步电网薄弱断面不再存在, 电网暂态功角稳定水平提升。另一方面, 西南电网异步运行后, 转动惯量仅为原两华电网的 1/5, 频率调节能力下降, 系统频率稳定问题突出。

1) 直流闭锁安控拒动引发高频风险

丰极小方式下, 直流故障后系统最高频率仿真结果如表 3 所示。

可以看到, 渝鄂背靠背, 直流闭锁故障不再导致渝鄂断面、特高压交流解列, 系统功角保持稳定。高频风险突出, 特高压直流单极、双极闭锁安控拒动均会引发严重的高频风险, 触发第三道防线, 需要加强安控运维, 确保直流故障后安控正确动作。

2) 特高压直流同时连续换相失败后高频风险

表 3 三大特高压直流闭锁后系统最高频率

Table 3 Maximal frequencies after three UHVDC blocking faults

故障	故障功率/MW	稳定情况	西南电网最高频率/Hz
复奉单极闭锁	3 200	稳定	50.8
锦苏单极闭锁	3 600	稳定	51.0
宾金单极闭锁	4 000	稳定	51.1
复奉双极闭锁	6 400	稳定	51.8
锦苏双极闭锁	7 200	稳定	52.3
宾金双极闭锁	8 000	稳定	52.5

丰极小方式下, 特高压直流同时连续换相失败后系统各区域最高频率仿真结果如图 4 所示。

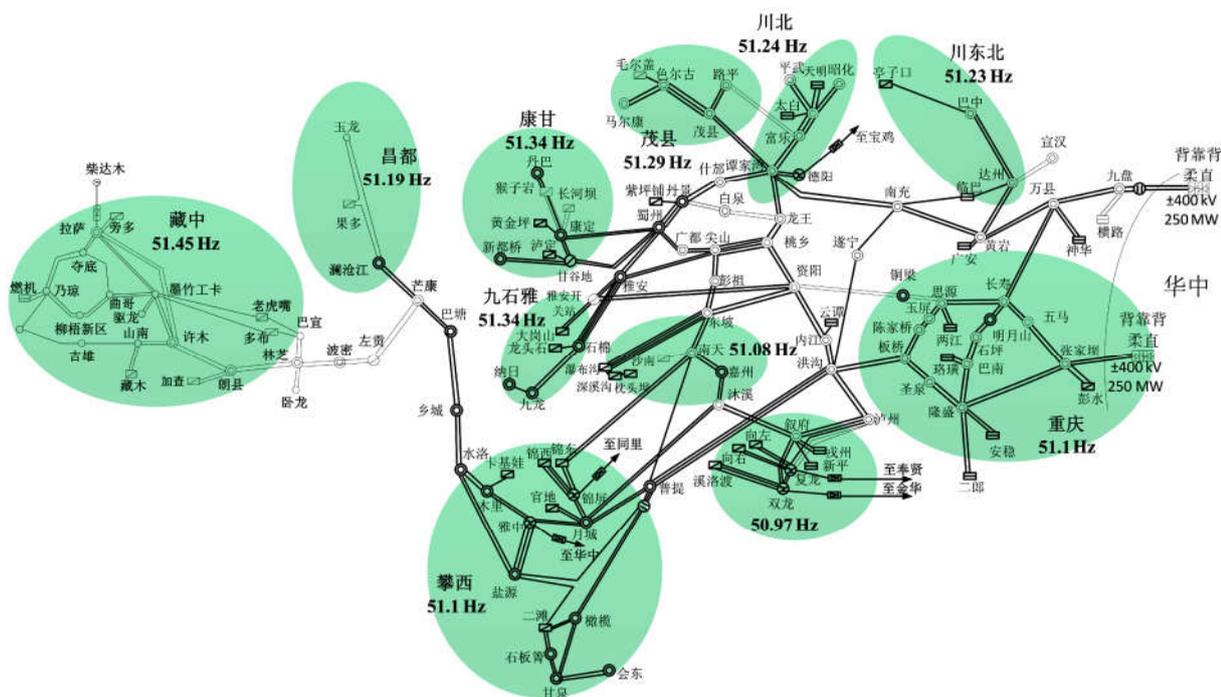


图 4 三大特高压直流同时连续三次换相失败高频时空分布

Fig. 4 Spatial and temporal distribution characteristics of maximum frequencies after three UHVDC consecutive, simultaneous commutation failure

3) 损失大电源时, 系统低频风险突出

西南电网转动惯量小, 损失大电源时, 系统低频风险突出。不考虑水电机组过载能力, 各运行方式下损失电源导致低频风险仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同运行方式下系统可承受最大功率缺额

Table 4 Maximum generation loss under different typical operating points

方式	开机/MW	功率缺额/MW	最大频率跌落/Hz	下降速率/(Hz/s)
丰大	75 000	1 400		0.011
丰小	55 000	1 100	1	0.016
丰极小	34 000	800		0.02

可以看到, 三大直流同时连续三次换相失败, 西南主网频率均超过 51 Hz, 且呈现出明显的时空分布特征, 水电通道末端及藏中电网频率较高, 各区域间最大频率偏差达到 0.5 Hz。

为将三大直流同时连续三次换相失败后频率限制在 51 Hz 以下, 需要限制三大直流功率在 11 000 MW 以下, 不利于水电外送; 若采取切机措施, 需要切机超过 8 000 MW, 但是, 直流换相失败恢复后由切机产生的功率缺额将导致电网频率持续降低(10 Hz 以上), 出现频率“又高又低”的问题, 需采取速降直流的配套措施。

可以看到, 不考虑任何旋转备用, 且忽略水电机组过载能力, 系统频率调节能力极弱, 丰大方式损失 1 400 MW 电源即会引起频率跌落 1 Hz 触发低频减载, 需配置大量旋备或启用直流功率调制。

若考虑模型中部分水电机组 1.1 倍过载能力, 相当于在系统中分布式配置了约 1 800 MW 旋转备用, 系统频率调节能力增强, 丰大、丰小方式下, 为防止频率跌落 1 Hz, 系统最大可承受功率缺额分别提升至 2 500 MW 和 2 000 MW。

4 超低频振荡

渝鄂背靠背, 为满足频率考核指标, 调速器

动态调节速度较快。渝鄂背靠背背后，西南电网孤网运行，水电占比达到 70%，水电机组“水锤效应”负阻尼会引发频率约为 0.05 Hz 的超低频振荡。

4.1 现象

丰极小方式下，扫描全网线路 N-1、N-2 故障，约有 70% 线路 N-2 故障以及 50% 线路 N-1 故障均会激发超低频振荡现象。洪板 N-1 后引发的超低频振荡如图 5 所示。

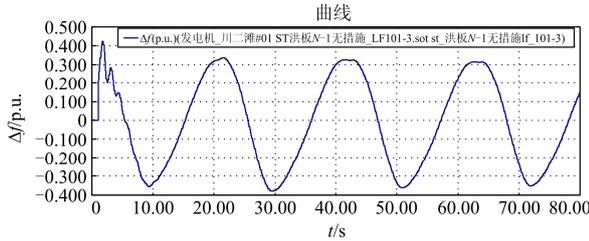


图 5 超低频振荡现象

Fig. 5 Ultra low frequency oscillation

4.2 机理分析

调速器和原动机组成的系统可表示为图 6。

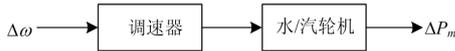


图 6 调速器、水轮机系统模型

Fig. 6 System model of governor and turbine

调速器和原动机系统的传递函数为

$$G = G_{\text{调速}} G_{\text{水/汽轮机}} \quad (1)$$

$$\Delta P_m = D_G \Delta \omega + K_G \Delta \delta \quad (2)$$

由 ΔP_m 与 $\Delta \omega$ 之间的传递函数可知， $D_G > 0$ 时发电机向系统提供正阻尼。将 $s = j\omega$ 代入上述传递函数可计算出调速器和原动机提供的阻尼系数随频率变化趋势。

在 PSASP 模型中，西南电网大型水电机组实测调速器通常采用 7 型或 8 型模型，其中 8 型调速器带有孤网模式。火电机组调速器采用 4 型模型。本文对西南电网中大型机组调速器阻尼特性进行分析，结果如下。

锦东电厂调速器为 7 型，不同水锤效应时间常数下调速系统阻尼系数如图 7 所示。

可以看到，7 型调速器在超低频段提供负阻尼，且随着水锤时间常数 T_w 增大，提供的负阻尼越多，在低频段出现一个负阻尼突变点。

8 型调速器阻尼特性分析如图 8 所示。可以看到，与 7 型调速器类似，功率模式同样在超低频段提供负阻尼，在孤网模式下提供的负阻尼减少，且在 0~0.07 Hz 提供正阻尼，孤网模式阻尼特性明显优于功率模式。

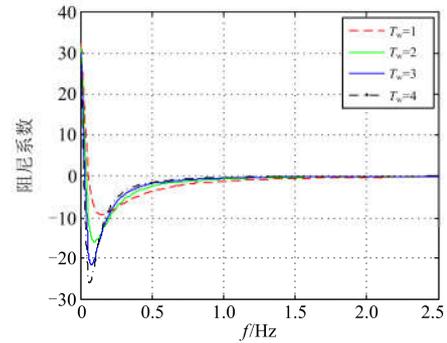


图 7 锦东水电机组调速系统在不同水锤时间常数 T_w 下的阻尼特性(7 型)

Fig. 7 Damping characteristic of governor of Jindong hydropower station under different T_w (Model 7)

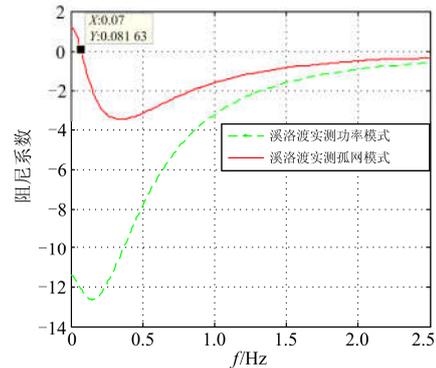


图 8 溪洛渡水电机组调速系统阻尼特性(8 型)

Fig. 8 Damping characteristic of governor of Xiluodu hydropower station (Model 8)

典型火电机组调速系统阻尼特性如图 9 所示。可以看到，调速系统在超低频段均提供正阻尼。

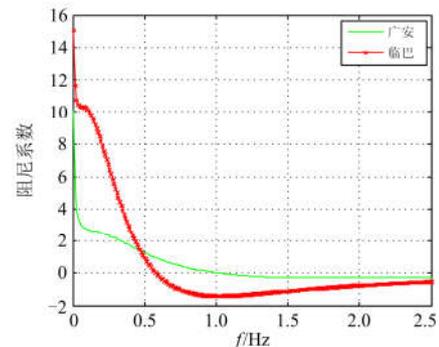


图 9 广安、临巴火电机组调速系统阻尼特性(4 型)

Fig. 9 Damping characteristic of governor of Guan'an and Linba thermal station (Model 4)

4.3 防控措施建议

在云南电网异步联网系统试验中已经发生了超低频振荡现象，并提出了两种抑制策略^[14]：1) 增大

部分水电机组一次调频死区, 使其大于直流 FLC 动作死区, 使得扰动时直流更多地承担调频作用;

2) 减小水电机组调速器 PID 参数, 减缓水电机组一次调频速度, 缓解“水锤效应”的负阻尼。两种方法都经过试验验证, 可以抑制超低频振荡, 但是会影响系统一次调频性能。

根据前文分析, 调速器在孤网模式下提供的负阻尼明显减少, 且在 0~0.07 Hz 提供正阻尼, 可考虑改变调速器联网-孤网模式切换条件。当前西南电网水电机组调速器进入孤网模式条件为 ± 0.5 Hz, 若将其改为 ± 0.2 Hz 时, 仿真结果如图 10 所示。

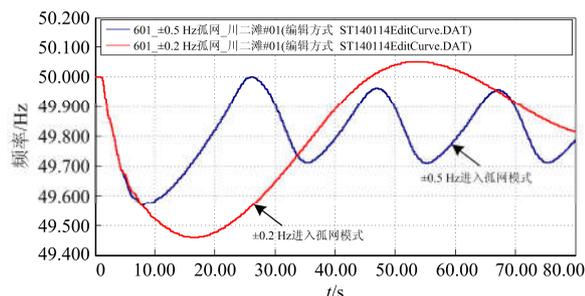


图 10 调整调速器进入孤网模式条件前后系统超低频振荡
Fig. 10 Ultra low frequency oscillation before and after adjusting the strategy of governor into the isolated grid mode

可以看到, 调速器的孤网模式对抑制超低频振荡有较为明显的作用, 相对而言, 孤网模式下 PI 参数增益相对正常方式较小, 可以减小水电机组提供的负阻尼。但其频率调节速度较慢, 不利于大扰动后频率恢复, 如图 11 所示。

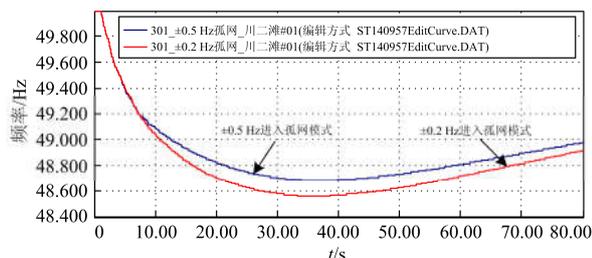


图 11 调整调速器进入孤网模式条件前后系统
频率响应(损失 2 400 MW 电源)

Fig. 11 Frequency responses before and after adjusting the strategy of governor into the isolated grid mode with generation loss of 2 400 MW

5 结论

本文对 2018 年渝鄂背靠背西南电网的安全稳定特性进行了研究, 得到以下结论:

1) 当前重庆电网不具备支撑渝鄂背靠背直流外送 5 000 MW 的能力, 需要对张恩、盘龙线路进

行增容改造, 并加快万县至九盘 500 kV 第三回线工程建设。

2) 小干扰特性变化, 原川渝-华中模式不复存在, 且川渝电网不再参与华中-华北模式, 川渝间为强阻尼, 西藏-川渝、川西-川南模式阻尼与外送功率水平强相关, 成为限制水电送出的新制约因素, 优化 PSS、补强网架均可提升水电送出能力。

3) 电网暂态功角稳定性有所提升, 直流故障后系统功角稳定, 不再成为限制川电外送的主要制约因素。

4) 系统转动惯量小, 频率调节能力弱, 频率稳定问题突出, 直流闭锁安控拒动后系统高频风险突出, 需要加强安控运维; 直流多次连续换相失败后高频风险突出, 且存在明显的时空分布特性; 损失大电源后系统低频风险突出, 且仿真结果与是否考虑水电机组过载能力强相关。

5) 系统存在严重的由于高水电占比“水锤效应”引起的超低频振荡风险, 调速器孤网模式在超低频段(0~0.07 Hz)提供正阻尼, 调速器提前进入孤网模式有利于抑制超低频振荡。

由于柔性直流具有灵活的调节性能, 可考虑在渝鄂柔直中配置适当的阻尼控制器对系统振荡进行抑制^[15]。频率稳定与调速器模型和参数、负荷频率特性等因素强相关, 当前系统模型中调速器模型并未完全实测, 作者将结合国网公司科技项目, 进一步对频率稳定相关问题进行深入研究。

参考文献

- [1] 陈涛, 冯丽, 吴迎霞, 等. 川渝电网提升川电东送输送能力的方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 131-136.
CHEN Tao, FENG Li, WU Yingxia, et al. Research on improving the capacity of power transmission from Sichuan to the east[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 131-136.
- [2] 郑超, 马世英, 盛灿辉, 等. 跨大区互联电网与省级电网大扰动振荡耦合机制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1556-1565.
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHENG Canhui, et al. Study on the oscillation coupling mechanism between interconnected power system and provincial power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1556-1565.
- [3] 陈乾, 沈沉, 汤蕾. 基于轨迹特征根的扰动冲击机理探索[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2061-2065.
CHEN Qian, SHEN Chen, TANG Lei. Study on the mechanism of disturbance impact on power system

- transient stability based on trajectory eigenvalues[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2061-2065.
- [4] 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)(发布稿)[EB/OL]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201612/P020161222570036010274.pdf>.
The electric power development planning of "13th Five-Year" (2016-2020) (issued version)[EB/OL]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201612/P020161222570036010274.pdf>.
- [5] 屠竞哲, 张健, 王建明, 等. 大规模直流异步互联系统受端故障引发送端稳定破坏的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5492-5499.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, WANG Jianming, et al. Mechanism analysis on the sending-side instability caused by the receiving-side contingencies of large-scale HVDC asynchronous interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5492-5499.
- [6] 陈湘, 刘兵, 任大江, 等. 交直流混联系统直流功率转移对交流电压的影响[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1957-1961.
CHEN Xiang, LIU Bing, REN Dajiang, et al. Study on influence of DC Power Transfer on AC voltages in hybrid AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1957-1961.
- [7] 潘晓杰, 张顺, 文汀, 等. 渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 157-162.
PAN Xiaojie, ZHANG Shun, WEN Ting, et al. Operation characteristic analysis of Central China Power Grid in unsynchronized interconnection of Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 157-162.
- [8] 杜宾, 张丹, 张军民, 等. 异步联网后云南电网的稳定特性与控制措施[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 13-16, 23.
DU Bin, ZHANG Dan, ZHANG Junmin, et al. Stability characteristics and control measures of Yunnan Power Grid after asynchronous interconnection[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 13-16, 23.
- [9] 叶圣永, 王云玲, 唐权, 等. 1 100 kV“疆电入川”特高压直流输电对四川电网安全稳定影响[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2727-2731.
YE Shengyong, WANG Yunling, TANG Quan, et al. Impact of $\pm 1 100$ kV UHVDC power transmission project from Xinjiang to Sichuan on security and stability of Sichuan Power Grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2727-2731.
- [10] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Guidelines for power system security and stability: DL 755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [11] 电力系统安全稳定控制技术导则: DL/T723—2000[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
Technical guide for electric power system security and stability control: DL/T723—2000[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [12] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 特高压交直流电网的小干扰稳定性分析[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 1-4.
ZHONG Wuzhi, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Small signal stability analysis for UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 1-4.
- [13] 电力系统安全稳定计算技术规范: DL/T 1234—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
Technical specification of power system security and stability calculation: DL/T 1234—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [14] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35-39.
ZHANG Jianxin, LIU Chunxiao, CHEN Yiping, et al. Countermeasures and experiments on ultra-low frequency oscillation of Yunnan Power Grid in asynchronous interconnection mode[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 35-39.
- [15] 徐友平, 张珂, 潘晓杰, 等. 渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 163-169.
XU Youping, ZHANG Ke, PAN Xiaojie, et al. Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 163-169.

收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-06-23

作者简介:

陈刚(1985—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: gangchen_thu@163.com

丁理杰(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

李旻(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网运行管理。

(编辑 周金梅)