

西北—新疆联网稳定特性分析

李刚¹, 刘晓瑞², 张廷营³, 尚勇¹

(1. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048; 2. 中南电力设计院, 湖北 武汉 430071;
3. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为掌握西北主网与新疆电网联网后可能存在的运行风险, 通过小干扰分析方法对联网后系统的稳定特性进行了研究, 结果表明全网动态稳定问题较为突出。在对新疆的强相关机组优化配置 PSS 后, 应能明显加强系统阻尼, 消除低频振荡风险。新疆向主网的送电通道还需接纳酒泉地区的大规模风电上网, 而电网较为薄弱, 动态稳定、频率稳定、电压控制等多种问题同时出现, 需加快研究落实相关安全稳定控制措施, 并做好多种控制措施之间的协调。

关键词: 联网; 750 kV 电网; 小干扰分析; 低频振荡; 频率稳定

System stability characteristic analysis for the interconnection of Northwest China grid and the Xinjiang grid

LI Gang¹, LIU Xiao-rui², ZHANG Ting-ying³, SHANG Yong¹

(1. Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China; 3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The system stability characteristic after the interconnection of Northwest China grid and the Xinjiang grid is studied by linear perturbation analysis method in this paper, so as to obtain the possible operation risk of the interconnection system. The results show that the dynamic stability of the interconnection system is weak under some situations. The system damping should be strengthened markedly and the risk of low-frequency oscillation should be removed by optimizing PSS of key units in the Xinjiang grid. In addition, large-scale wind power generation in Jiuquan area will be transmitted by the interconnection pathway between the main grid and the Xinjiang grid. In view of the weak power grid, many problems including dynamic stability, frequency stability and voltage control will occur at the same time. So the corresponding stability control method should be researched and applied as soon as possible. Meantime, the different control methods should be coordinated to maximize their effects.

Key words: grid interconnection; 750 kV power grid; perturbation analysis; low-frequency oscillation; frequency stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)17-0064-06

0 引言

2010年西北主网通过750 kV电压^[1]与新疆实现同步联网后西北将形成全国覆盖范围最大的交流电网。陕甘青宁与新疆的负荷中心相距遥远, 中间通过长距离750 kV双回线路相连, 整个送电通道西起新疆吐鲁番、东至甘肃永登, 全长1 577 km, 而从电网最西部的伊犁到最东部的陕北距离将超过3 800 km, 属于比较典型的长距离弱联系系统。

对于这种长距离弱联系系统, 弱阻尼低频振荡是受到广泛关注的问题^[2-9]。若低频振荡无法通过常规手段(如PSS)消除, 则电网的动态稳定水平偏低, 将不得不降低联网功率或者改成直流联网^[10]。原东北—华北—华中通过500 kV交流线路弱联系

统后曾发生过低频振荡(目前东北与华北通过高岭直流工程联网), 西北与新疆同步联网后是否会发生弱阻尼振荡受到高度关注。

本文重点利用小干扰分析方法对2010年和2012年西北电网进行了较为全面的研究, 以期掌握联网后的电网稳定特性, 为系统运行控制、PSS优化配置以及安稳措施实施等方面提供参考^[11-14]。

1 主要边界条件

根据规划设计的负荷预测水平, 2010年西北五省负荷约为5 000万kW, 2012年约为6 300万kW。研究中所采用的2010年的西北电力外送规模为411万kW(灵宝+德宝直流), 2012年约为1 600万kW(主要是新增了宁夏东部两条大容量直流)。

2010年陕西-甘肃断面由两回750 kV+四回330 kV线路组成、甘肃-青海断面由四回750 kV+六回330 kV线路组成、甘肃-宁夏断面由两回750 kV+三回330 kV线路组成、新疆-西北主网断面由两回750 kV线路组成。

2012年网架结构上的重要变化是陕西和宁夏之间增加了一回750 kV联络线, 陕西和甘肃之间增加了两回750 kV联络线(见图1, 图中圆框大小近似示意电网覆盖面积大小)。此外, 陕甘和甘青断面的750/330 kV电磁环网解环运行。

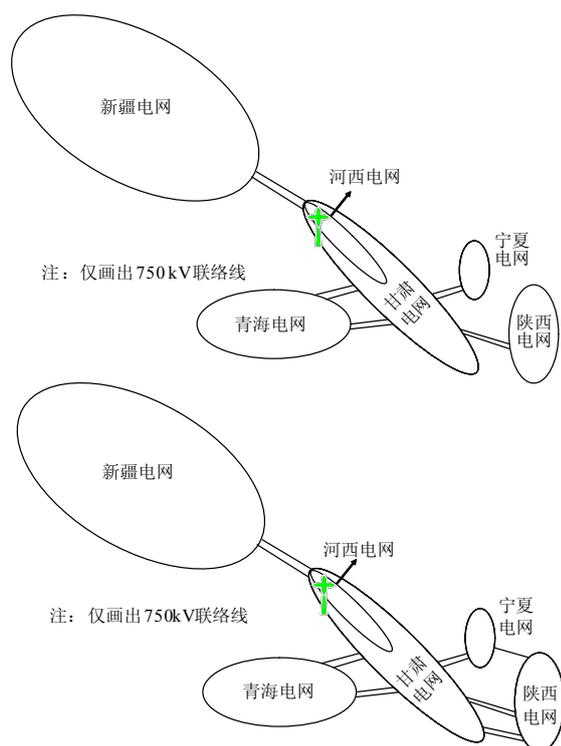


图1 2010和2012年西北电网结构示意图

Fig.1 Structure of Northwest grid in 2010 and 2012

研究手段: 使用PSASP6.26的小干扰计算功能进行频域分析, 并辅以时域的暂态稳定仿真进行对比。计算以西北电网的冬大、冬小、夏大、夏小四种典型运行方式为基础^[15], 综合分析了不同影响因素下的结果。

小干扰分析的主要内容包括: (1) 联网前后的结果对比; (2) 联络通道传输功率^[16]和阻抗大小的影响; (3) 不同运行方式的影响; (4) PSS的作用; (5) 2010和2012年的结果对比(网架变化的影响)。

由于2010年后甘肃河西地区(酒泉、安西)将有超过500万kW的风电上网^[17], 不仅位于新疆-主网的送电通道上, 还处于联网断面(哈密-安西)附近, 对联网影响较大, 研究中将河西风电作为一

个单独的影响因素进行分析。此外, 为提高河西750 kV电网的输电能力, 将来可能安装750 kV串补, 目前研究确定的串补率为: 安西-酒泉-金昌-永登三段线路分别是30%、50%、40%。

以下如无特殊说明, 则采用的默认计算条件为:

- (1) 河西电网有串补, 风电不开机;
- (2) 现有PSS投运(共70台);
- (3) 新疆向主网送电100万kW;
- (4) 2010水平年。

2 小干扰分析主要结果

2.1 联网前后系统稳定特性的变化

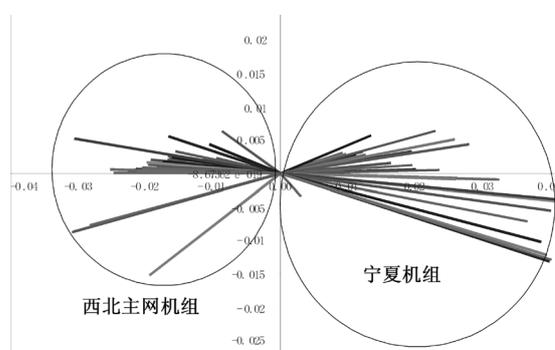
从表1中的计算结果可知, 联网后增加了一个新疆(西部)机组对主网机组的振荡模式, 其频率在0.4 Hz左右, 阻尼比约为4%。原有的宁夏对主网及玉门对主网这两个振荡模式的阻尼比均有一定程度的削弱, 但仍属于强阻尼。图2给出了模式11(宁夏对主网)和13(新疆对主网)的模式态图。

表1 联网后系统低频振荡模式的变化

Tab.1 Change of the system low-frequency oscillation modes after the grid interconnection

基础潮流	模式编号	频率/Hz	阻尼比/%	振荡模式说明
冬小, 西北-新疆不联网	1	0.698 9	10.621	宁夏对主网
	2	0.698 8	7.073	玉门等对甘肃
冬大, 西北-新疆不联网	4	0.705 7	10.399	宁夏对主网
	5	0.689	6.831	玉门等对甘肃
冬小, 西北-新疆联网, 新疆送100万kW	7	0.696 9	10.47	宁夏对主网
	8	0.690 2	6.845	玉门等对甘肃
	9	0.386 2	4.312	新疆对主网
冬大, 西北-新疆联网, 新疆送100万kW	11	0.705 9	10.312	宁夏对主网
	12	0.680 6	6.561	玉门等对甘肃
	13	0.404 8	4.21	新疆对主网

注: 表中给出的是参与因子大于0.001、频率低于0.9 Hz的低频机电振荡模式(下同)。



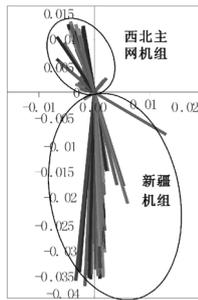


图 2 模式 11 和 13 的模态图

Fig.2 Modal figure of mode 11 and mode 13

此外，新疆内部存在南北机组之间的低频振荡模式，频率约 0.66 Hz，阻尼比约为 3%，接近弱阻尼，需在更多机组上安装 PSS。

2.2 联络通道传输功率和阻抗大小的影响

西北与新疆联网断面为哈密—安西断面，但新疆主网向西北主网的送电通道则由吐鲁番—哈密—安西—酒泉—金昌—永登，包括 5 个断面。研究将分别对哈安断面和安—酒—金—永所组成的河西电网进行分析。

(1) 哈安断面

由表 2 可见，当其他条件不变，将哈密—安西断面送电功率从 100 万 kW 增加到 200 万 kW 以后，新疆对主网振荡模式的阻尼比下降到 2.18%，减少约 2%，从中等阻尼变为弱阻尼。

表 2 新疆送电功率对系统阻尼的影响

Tab.2 Influence of transmitted power from Xinjiang grid for the system damping

基础潮流	模式编号	频率/Hz	阻尼比/%
新疆送电 100 万 kW	13	0.404 758	4.209 9
新疆送电 200 万 kW	55	0.350 587	2.182 3

注：河西无风电上网。

若哈安断面的一回联络线检修，则联网阻抗增大，同样会削弱系统阻尼。计算表明，同样在新疆送电 100 万 kW 的情况下，与两回联络线运行的情况相比，此时新疆对主网振荡模式的阻尼比将减少约 0.4%。

(2) 河西 750 kV 电网

酒泉风电位于新疆向主网的送电通道上，风电上网将显著增加整个联网送电通道的潮流。由表 3 可见，新疆送电 100 万 kW 不变，酒泉风电上网功率从 0 增加到 230 万 kW 以后，原有振荡模式的阻尼比均有所削弱，特别是在冬大方式下，新疆对主网的阻尼比减少了 1.1%，接近于弱阻尼（3%）。继

续增大风电出力后该模式阻尼比将减小到 3% 以下，动态稳定问题较为突出。

表 3 酒泉风电对系统阻尼的影响

Tab.3 Influence of wind power generation in Jiuquan area for the system damping

基础潮流	模式编号	阻尼比/%	振荡模式说明
冬小, 风电 0	7	10.469 7	宁夏对主网
	8	6.844 6	玉门等对甘肃
	9	4.311 6	新疆对主网
冬大, 风电 0	11	10.311 6	宁夏对主网
	12	6.560 7	玉门等对甘肃
	13	4.209 9	新疆对主网
冬小, 风电 230	15	10.241 6	宁夏对主网
	16	6.656	玉门等对甘肃
	17	4.241	新疆对主网
冬大, 风电 230	19	9.829 6	宁夏对主网
	20	6.299	玉门等对甘肃
	21	3.203 7	新疆对主网

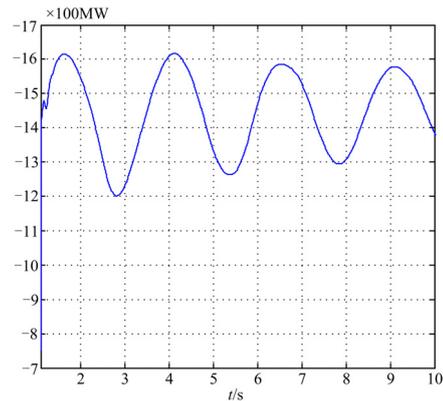


图 3 线路功率振荡曲线

Fig.3 Line power oscillation curve

图 3 为模式 21 所对应的运行方式的时域暂态稳定仿真结果：故障后安西—酒泉线路的功率振荡曲线。由 Prony 分析可得，其主导模式频率为 0.403 Hz，阻尼比为 1.617%（大扰动后的阻尼比低于小扰动），与频域分析结果是一致的。

另一方面，若河西 750 kV 电网串补退出运行，则整个联网通道阻抗增加，会削弱系统阻尼。计算表明，此时新疆对主网振荡模式的阻尼比降低约 0.1%。经分析，认为串补影响较小的主要原因是酒泉风电上网为 0，河西 750 kV 电网潮流很轻，串补尚不能有效发挥作用；对于河西 750/330 kV 电磁环网，只有 750 kV 线路潮流重载时串补的作用才能充分发挥。

比较上述结果可以发现，新疆送电功率增加和

酒泉风电大规模上网均会明显削弱联网后系统的动稳水平,且前者影响更大,这表明对于新疆—主网振荡模式而言,“十二五”初期电网联系的最薄弱处不在河西地区,而在靠新疆侧的联络通道上。

此外,暂稳计算结果表明,联网初期新疆自哈安断面向主网送电极限不超过 200 万 kW,受动稳水平限制。考虑到酒泉地区风电上网规模大,为避免系统动态失稳,在主网架继续增强、新疆相关机组 PSS 得到优化配置之前,新疆向主网的送电规模不宜过大。

2.3 不同运行方式的影响

根据对冬大、冬小、夏大、夏小等不同典型运行方式的计算分析表明:总体上,夏大、冬大、夏小、冬小这几种典型运行方式的阻尼依次增强;西北电网在夏大方式下阻尼最弱。

此外,不同的开机方式和电力流向对振荡阻尼可能有明显的影响,主要体现为陕西—甘肃断面电力流向的影响:受故障后动态稳定的限制,新疆向主网送电后陕甘断面的东电西送能力下降明显;同时,陕甘断面东电西送也影响新疆送电能力,计算表明,当陕甘断面由西电东送 150 万 kW 变为东电西送 60 万 kW 时,新疆对主网振荡模式的阻尼比由 4.5% 下降到 2.9%。

但是,陕甘断面大规模东电西送主要是为满足青海负荷需要,可部分被新疆电力所代替。2012 年后,随着太阳山—榆横线路的投运,陕西的东电西送能力明显提高,但失稳形式仍然是动态失稳。

2.4 PSS 投退的影响

若不投入 PSS,则全网的阻尼特性将明显恶化,其中:新疆对主网模式阻尼比将下降到约 1.4%,变为弱阻尼。由于本次计算中新疆机组 PSS 投入较少,若在新疆更多的机组上配置 PSS,则全网的阻尼特性和动稳水平应有更大的改善。

2.5 2010 和 2012 年的计算结果对比

相比于 2010 年,2012 年在主网架上最显著的变化是东西部之间增加了两个新的联络通道:750 kV 兰州东—天水—宝鸡和太阳山—榆横线路,从而大大增强了主网东西部之间的电气联系。

由表 4 可见:兰天宝和太榆线路均投运时,新疆—主网模式阻尼比提高约 0.96%;仅有兰天宝线路投入运行时,阻尼比提高约 0.48%;仅有太榆线投入运行时,阻尼比提高约 0.81%。因此,太阳山

—榆横线路投运对于改善全网阻尼特性、提高动态稳定水平作用较为明显。

表 4 2012 年振荡模式的变化

Tab.4 Change of the oscillation modes in 2012

基础潮流	模式编号	阻尼比/%
2010 年冬大, 新疆送电 100 万 kW	29	2.876 9
2012 年冬大, 新疆送电 100 万 kW, 全接线	45	3.836 6
2012 年冬大, 新疆送电 100 万 kW, 仅有兰天宝, 无太阳山-榆横	46	3.357 9
2012 年冬大, 新疆送电 100 万 kW, 仅有太阳山-榆横, 无兰天宝	47	3.689 5
2012 年冬大, 新疆不送电, 全接线	48	7.216 9
2012 年夏大, 新疆不送电, 全接线	49	6.598 1

3 联网安全稳定运行风险分析

3.1 联网后的动态稳定问题

(1) 联网后的系统动态稳定特性

① 联网前后,最主要的差别是新增了新疆—西北之间的低频振荡模式,其阻尼中等偏弱,在现有机组 PSS 投运的情况下,阻尼比大致在 4% 左右;

② 动态稳定水平是制约新疆向主网送电能力的主要因素,“十二五”初期新疆向主网的送电能力不超过 200 万 kW;

③ 2012 年后随着主网架的增强,全网的阻尼特性和动态稳定水平将逐步得到较为明显的改善,低频振荡风险下降。

(2) 联网后影响动态稳定的主要因素

① PSS: 若不考虑现有发电机组的 PSS 投运,则新疆—主网振荡模式呈弱阻尼。

② 新疆向主网送电的规模:联网初期对于联网的动稳水平影响较大。

③ 河西风电上网规模:酒泉上网风电规模较大(如超过 300 万 kW)时,有弱阻尼振荡风险。

(3) 提高动稳水平的对策和建议

① 专题研究并在强相关机组投运 PSS、优化 PSS 配置,能显著提高系统的动态稳定性;考虑联网后系统的动态特性变化较大,还应对已投运的 PSS 参数进行重新校核,保证其效果始终较优;

② 联网初期新疆向主网送电不宜过大;

③ 哈密地区作为联网的中间点,距离新疆主网较远,需加强网架建设并合理安排电源的接入。按照最新规划,2012 年后将投运哈密±800 kV 特高压直流外送工程,其配套火电电源能够为新疆向主

网送电提供有力的电压支撑,对于提高联网稳定性是有利的,应加快落实配套电源。

3.2 联网后的频率稳定问题

(1) 联网后系统频率失稳风险

由于河西风电上网规模大,加之新疆还要向主网送电,因此,一旦联网送电通道全失,有可能造成频率失稳:当故障解列点在联网断面上或者新疆内部时,电网安全风险主要在于新疆电网的高周问题;而当故障解列点在河西输电通道上时,则不仅新疆电网的高周问题更加严重,主网的低频减载也可能动作。具体分析如下。

① 故障解列点在联网断面上或者新疆内部。由于规划在 2010~2012 年新疆向主网的送电规模不会超过 100 万 kW,因此,解列对主网的冲击不大(2010 年后主网负荷水平在 3000 万 kW 以上);但新疆电网规模较小,需防止出现高周问题。

② 故障解列点在河西输电通道上。由于酒泉地区有大量风电集中上网,在上网风电规模较大时(如超过 300 万 kW),联网通道最大输送功率将超过西北主网负荷规模的 10%,一旦通道因故障全失可能造成主网低频减载动作。对于新疆电网而言,高周问题将更加突出,必须立刻断开哈密—安西联络线(相当于切除风电),同时需进行高周切机(因为仍有 100 万 kW 多余出力)。

(2) 对策和建议

① 保证适当规模的旋转备用;

② 合理配置主网低频减载方案和新疆高周切机方案;

③ 重点研究和落实联切风电场方案;

④ 新疆与主网的解列点尽可能在哈密—安西联网断面上,这样对主网和新疆的冲击均最小,解列操作也易于实施;

⑤ 专题研究上述电网第二、三道防线中多种控制措施的优化协调;

⑥ 研究利用外送直流的紧急功率控制(直流功率速降)功能,可以减少低频减载切负荷量。

2012 年后规划建设哈密和嘉酒特高压直流外送工程,其配套火电电源将为哈密、安西和酒泉地区提供大量的动态无功支撑,将提高全网的动态、暂态稳定水平和电压稳定水平,对平抑风电随机性造成电压波动也很有利;另一方面,考虑直流外送工程后全网的频率稳定性也能得到明显的改善。

4 结语

西北与新疆联网后全网稳定特性最重要的变化是动态稳定水平下降,特别是对新疆送电能力和酒泉风电上网能力存在较为明显的制约;但是,在对新疆的强相关机组优化配置 PSS 后,应能明显提高

系统阻尼,消除低频振荡风险。

此外,酒泉风电上网问题和新疆—西北主网联网问题密切相关:由于联网通道上有大量风电上网,且通道本身存在全失的风险,因此联网后的稳定问题涉及动态稳定、频率控制、电压控制(由于风电)等多个方面,严重情况下可能需要切机(包括切除风电机组)、切负荷、乃至未来的直流调制等电网安全稳定第二道防线以及振荡解列等电网安全稳定第三道防线共同发挥作用,做好多种控制措施的协调。

参考文献

- [1] 丁新良. 750 kV 电压等级是西北电网发展的必然选择[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 23-26.
DING Xin-liang. 750 kV an inevitable choice of higher voltage grade for northwest power grid in China[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 23-26.
- [2] 赵珊珊, 周子冠, 张东霞, 等. 大区互联电网动态稳定风险评估指标及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 68-72.
ZHAO Shan-shan, ZHOU Zi-guan, ZHANG Dong-xia, et al. Risk assessment index of dynamic stability for large-scale interconnected grids and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 68-72.
- [3] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 1-5.
ZHU Fang, TANG Yong, ZHANG Dong-xia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grids in China and their solutions[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 1-5.
- [4] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.
ZHU Fang, ZHAO Hong-guang, LIU Zeng-huang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.
- [5] 赵学强, 励刚, 郭强. 华东电网 2007 年度小干扰稳定分析[J]. 华东电力, 2007, 35(11): 50-53.
ZHAO Xue-qiang, LI Gang, GUO Qiang. Small signal stability analysis for East China Grid Power Grid in 2007[J]. East China Electric Power, 2007, 35(11): 50-53.
- [6] 胡剑琛, 胡飞雄, 李 献, 等. 海南电网联网后的频率稳定与措施[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 31-35.
HU Jian-chen, HU Fei-xiong, LI Xian, et al. Frequency stability and control measures of Hainan Power Grid after interconnection with China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(5): 31-35.
- [7] 孙景强, 陈志刚, 曹华珍, 等. 南方电网 2010 年低频振荡问题[J]. 电网技术, 2007, 31(S2): 93-97.

- SUN Jing-qiang, CHEN Zhi-gang, CAO Hua-zhen, et al. Analysis of low frequency oscillation of South China Power Grid in 2010[J]. Power System Technology, 2007, 31 (S2): 93-97.
- [8] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 78-83.
- DENG Ji-xiang, HE Jian-ming, YAO Tian-liang, et al. Analysis of lower frequency oscillation for Sichuan Power Grid in large scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2008, 32 (17): 78-83.
- [9] 赵义术, 杨树新, 牛新生, 等. 2005年冬季华北-华中联网运行中的低频振荡计算分析[J]. 山东电力技术, 2006 (2): 3-6.
- ZHAO Yi-shu, YANG Shu-xin, NIU Xin-sheng, et al. Low-frequency oscillation analysis of the interconnected power system of Hubei and Huazhong in the winter operating arrangement in 2005[J]. Shandong Electric Power Technology, 2006 (2): 3-6.
- [10] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [11] 汤涌, 朱方, 张东霞, 等. 华北-东北联网工程系统调整试验[J]. 电网技术, 2001, 25 (11): 46-54.
- TANG Yong, ZHU Fang, ZHANG Dong-xia, et al. Commissioning tests of interconnection of North China Power Grid with Northeast China Power Grid[J]. Power System Technology, 2001, 25 (11): 46-54.
- [12] 房喜, 印永华, 杨万开, 等. 750 kV 输变电示范工程系统小扰动试验分析[J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 40-43.
- FANG Xi, YIN Yong-hua, YANG Wan-kai, et al. Analysis on system small disturbance test of 750 kV pilot project[J]. Power System Technology, 2006, 30 (24): 40-43.
- [13] 危雪, 周云海, 胡翔勇. 基于小干扰稳定分析的电力系统稳定器配置研究[J]. 广东电力, 2008, 21 (11): 1-4.
- WEI Xue, ZHOU Yun-hai, HU Xiang-yong. Study on configuration of power system stabilizer based on small-signal stability analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21 (11): 1-4.
- [14] 李楠楠, 刘文颖, 潘炜, 等. 西北 750 kV 电网动态稳定特性分析和控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31 (12): 63-68.
- LI Yang-nan, LIU Wen-ying, PAN Wei, et al. Analysis of dynamic stability characteristic of 750 kV northwest China power grid and research on its control strategy[J]. Power System Technology, 2007, 31 (12): 63-68.
- [15] 王青, 孙华东, 等. 电力系统小干扰稳定安全评估的一般原则及其在贵州电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33 (6): 24-28.
- WANG Qing, SUN Hua-dong, et al. General principle of power system small signal stability evaluation and its application in Guizhou power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33 (6): 24-28.
- [16] 刘学智, 刘涤尘, 袁荣湘, 等. 联络线潮流对互联电网低频振荡模式的影响[J]. 中国电力, 2009, 42 (10): 39-41.
- LIU Xue-zhi, LIU Di-chen, YUAN Rong-xiang, et al. The influence of tie-line power flow on low-frequency mode in interconnected power system[J]. Electric Power, 2009, 42 (10): 39-41.
- [17] 汤宏, 吴俊玲, 周双喜. 包含风电场电力系统的小干扰稳定分析建模和仿真[J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 38-41.
- TANG Hong, WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi. Modeling and simulation for small signal stability analysis of power system containing wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28 (1): 38-41.

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-05-24

作者简介:

李刚 (1979-), 男, 博士, 工程师, 主要从事电网规划和运行控制方面的研究工作; E-mail: lgjjj3@163.com

刘晓瑞 (1978-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网工程设计工作;

张廷营 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事 FATCS 装置和次同步谐振方面的研究。

(上接第 63 页 continued from page 63)

- [8] 云南电网公司调度自动化系统黑启动预案[EB/OL]. <http://gaoyugui.blog.sohu.com/118833602.html>.
The black start preplan of the dispatching automation system of Yunnan Power Grid Corporation. Compilation[EB/OL]. <http://gaoyugui.blog.sohu.com/118833602.html>.

作者简介:

高明 (1978-), 男, 工程师, 硕士, 从事电力系统分布式计算与电力系统仿真研究; E-mail: gaoyugui0508@163.com

李文云 (1965-), 男, 教授级高级工程师, 从事电网运行管理及电力系统稳定分析研究工作;

袁德君 (1966-), 男, 高级工程师, 从事 EMS 运行管理工作。

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2010-04-19