

大区联网条件下四川电网低频振荡再分析

姚天亮, 白洋, 欧小高, 邓集祥

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要:结合诱发低频振荡的四大主要因素和四川实际电网的特点,揭示了大区联网条件下四川电网容易出现低频振荡的原因。通过对四川电网进行低频振荡再分析,研究了网架结构的变化、运行条件、发电机励磁和 PSS 模型参数以及串补对主导低频振荡模式阻尼的影响。运用多机电力系统二阶解析解对线性一阶解进行二阶非线性修正,通过比较分析一阶和二阶相关因子,有助于发现和认识与主导低频振荡模式相关性最强的发电机组,对配置 PSS 抑制低频振荡有指导意义。

关键词:大区联网;主导低频振荡模式;二阶解析解;阻尼

Abstract: Combination of the four major factors leading to low-frequency oscillations and the characteristics of the actual power grid for Sichuan. Reveals the reasons why Sichuan power grid under large regional interconnections is prone to low-frequency oscillations. By means of resume analysis of dominant inertial modes for Sichuan power grid, the damping effects of the changes of power grid structure, different operating modes, excitation and PSS models, series compensators are re-searched. The explicit second order solutions of multi-machines system are used to amend the first order linear solutions with second-order nonlinear impactation by comparison of the first order and second order participation factors. It can help to find the most related generators of dominant inertial modes and can made guiding sense of PSS disposition and low-frequency oscillations suppression.

Key words: large regional interconnections; dominant low-frequency oscillations models; second order solutions; damping

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-6954(2008)04-0045-05

跨区输电和大区联网是现代电力系统发展的必然趋势,到 2010 年中国将初步形成以三峡电网为中心的北部(东北、西北、华北和山东地区电网)、中部(华中、华东、川渝地区电网)和南部(广东、云南、贵州南方联合电网)三大电网大区互联的超大规模电网,实现水电“西电东送”和煤电“北电南送”的跨大区联网、跨大区输电的宏伟目标。但是随着区域电网弱互联规模的扩大和新型大容量发电机组自动控制新技术的引进,特别是高增益快速励磁系统的广泛应用,大大降低了系统的阻尼,必然诱发弱阻尼甚至负阻尼低频振荡现象^[1~4]。

文献[5]给出了求取实际大规模实际电力系统主导低频振荡模式(主振模式)的办法,巧妙地解决了 PSASP6.24“逆迭代转 Rayleigh 商迭代法”的漏根问题,求出了与四川电网相关的主振模式。但是当时四川许多水电机组励磁系统和 PSS 参数都是测试、试验前的数据,PSASP 程序中模型和参数值不准确,并且现在四川电网 500 kV 主网架结构也加强了,万龙双回线、二普线加装了串补。上述因素必然对四川电

网主导低频振荡模式造成影响。采用的新数据中,四川机组励磁系统和 PSS 的模型、参数都是依据测试实验数据修改后的模型和参数,将计算得到的主振模式与文献[5]中结果进行对比,分析了网架结构变化、不同运行方式以及串补对主导低频振荡模式阻尼的影响。通过 PSS 投退试验,引入多机电力系统二阶解析解对传统的小干扰一阶线性化分析进行二阶非线性修正,有助于找到与主导低频振荡模式影响最大的发电机组。

1 四川实际电网特点与低频振荡原因分析

在诱发低频振荡的诸多因素中,“弱联系、长线路、重负荷、高放大倍数快速励磁”四个特点与之关系最密切也最受人关注。下面结合大区联网条件下四川实际电网的特点阐明其存在低频振荡模式的必然性:

(1)弱联系、长线路、重负荷。四川省幅员辽阔,资源分布不均衡(水能资源 90%以上集中在西部),

电力系统总体结构还较为薄弱,是典型的弱联系和长链状的系统结构。大区联网后,特别是在丰水期大运行方式下将有大量电力远距离送往华中,输电线路承载力接近其稳定极限运行,稳定问题比较突出。特别是攀枝花地区二滩水电站是川渝电网的骨干电源点,发电量占四川电网的 1/3,占川渝电网的 1/4,但是因为远离负荷中心,必然有大量电力经 1100 余千米的 500 kV 输电线路向川渝和华中送电,输电距离长,输送潮流重,电力汇集过于集中,是典型的远距离、重负荷输电系统^[6]。

(2)快速励磁与 PSS 配置情况。四川所有发电机全都采用三绕组模型模拟(包括所有 50 MW 左右的小机组),而且都配有励磁及励磁调节器、调速器,就是几万千瓦的小发电机也配有励磁系统,而目前其他省份区域电网这种小发电机都是用 0 型或 1 型发电机模型模拟。另外,四川所有容量稍大一点的发电机都配有 PSS 就连一些不到 10 万 kW 的小发电机,因在小干扰稳定中的特殊地位,也配有 PSS 而其他区域有些大容量发电机(如:蒙达 G1、G2 600 MW 等)还都没有配 PSS。水电机组绝大多数采用自并励快速励磁,这种位于送电端的发电机自动励磁调节器同时也给系统提供了负阻尼,增加了系统发生低频振荡的可能性,这是快速励磁系统的固有特性所决定的。

2 低频振荡线性化分析及二阶非线性修正

N 台发电机电力系统的动态过程可以用非线性状态方程描述:

$$\dot{X} = F(X, \Phi) \quad (1)$$

式中: X 为 N 维状态向量; Φ 为求解机端电压方程和非线性网络方程得到 M 维中间变量。将 (1) 式在系统稳定平衡点处泰勒级数展开:

$$\dot{x}_i = A_i x + \frac{1}{2} X^T H^i X + H \cdot O \cdot T \quad (2)$$

(2) 式中: A_i 为系统雅可比矩阵 A 的第 i 行, Hⁱ 为海森矩阵 H 的第 i 个子阵, H · O · T 为二阶以上高阶项。

传统的低频振荡分析主要是指小干扰稳定范畴的模式(特征值)分析,通过计算在运行点的线性化系统状态矩阵 A 的特征值、特征向量、特征值灵敏度和参与因子等,分析各个振荡模式与发电机之间的关

联程度,进而找到振荡不稳定的原因。但是当前全国大区电网的互联,联络线潮流加重,使得系统 Stressed 度加大,系统参数与主导低频振荡模式间呈现较强的非线性特性。在此情况下若仅仅考虑一阶相关性而忽略二阶以上的高阶项,进行单纯的小干扰线性化分析,不能很好地把握系统的动态特性。运用基于向量场正则形(Normal Form)理论推出的电力系统二阶近似解析解,能够很好地解释上述问题。

电力系统二阶解析解:

$$i(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} z_j e^{h_j t} + \sum_{j=1}^N u_{ij} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{k,l}^2 z_k z_l e^{(\lambda_k + \lambda_l) t} \quad (3)$$

(4) 式中包含了大量二阶非线性相关信息,用求取线性相关因子相同的办法求得单个模式的 2 阶非线性相关因子:

$$p_{ki}^2 = u_{ki} (v_{ki} + v_{kk}^2) \quad (4)$$

p_{ki}² 表明第 k 个状态变量与第 i 个模式的二阶非线性相关作用。它的第一项就是线性相关因子 p_{ki} 提供了模式和状态变量间线性相关的信息,而另一项是对线性相关作用的非线性修正,它包含有模式和模式、模式和状态变量间非线性相关作用的信息。因此低频振荡问题的分析应该综合考虑一阶、二阶相关因子,把系统参数的变化与主导低频振荡模式非线性相关作用联系在一起,以寻找对主导模式非线性影响较大的系统参数,进而找到主导系统动态特性的薄弱环节^[7~9]。

3 四川电网主振荡模式再分析

3.1 电网参数及运行条件

仿真计算数据包:“国调合成 2007 年滚动 0512”,参与计算的数据中共有发电机 892 台。四川电网(共计 137 台)发电机模型全部计及了励磁系统和调速系统,同步机采用 3 绕组模型。四川网内主要机组均配置 PSS 其他区域主力发电机组配有 PSS。PSASP 6.24 小干扰稳定算法为“逆迭代转 Rayleigh 商迭代法”搜索部分特征值。

全接线典型方式:国调下达的潮流 303 作业,即:鄂豫 220,鄂湘—160,鄂赣 120,鄂渝—180,山东送出 100,辛恒北送 100。四川各主力发电机基本满发,潮流为能够满足网内外三相故障暂稳要求的最大潮流。

检修方式:2007 年检修计划,500 kV 考虑洪龙二

线、洪山线同时检修、崇山第二回线未能按时投运、茂县至谭家湾一回线停运、并且川渝断面中洪陈一回线停运; 220 kV 考虑朱坎一夹江一回线检修、沫松一回线和铜松一回线检修、赤白线和赤丰线检修。

全接线典型运行方式、检修运行方式及文献 [5] 中 572 作业主要潮流结果对比。见表 1。

表 1 主要断面及线路潮流对比 单位: 万 KW

断面或线路	303潮流	检修方式	572潮流
鄂渝断面	-50. * 2; -39. * 2	-49* 2; -36* 2	-180
川渝断面	117* 2	187	417
谭家湾一南充线	38	71	33
尖山一龙王线	51	56	52

3.2 四川电网主导低频振荡模式

电网互联增加的低频振荡模式是“区域间振荡模式”, 尤其是一个区域的所有发电机相对另一个区域内的所有发电机振荡的区域间振荡模是影响全局的, 称“主振模式”。小干扰稳定主导特征值是指比较靠近虚轴(实部绝对值很小), 阻尼也最差的弱阻尼模式。衰减阻尼比 ζ 的大小反映到时域响应曲线就是振荡衰减的快慢, 阻尼比 ζ 越大振荡衰减就越快, 对抑制低频振荡越有利。阻尼比 $\zeta < 0.05$ 的弱阻尼振荡模式, 必须采取措施来改善它的阻尼。

仿真计算得到与四川电网相关的主振模式(包括 3 个大区域间模式和 4 个网内小区域间模式)与文献 [5] 中的主振模式及联网前文献 [10] 提到的模式基本相对应。尤其是区域间模式的振荡模态、参与机组分群及相关因子基本不变。其中两个区域间振荡模式的模态图见图 1。

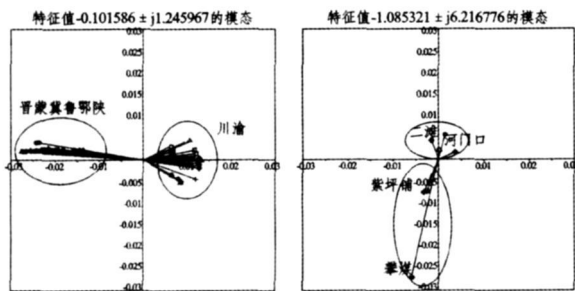


图 1 0.198Hz 和 0.989Hz 区域间低频振荡模式模态图

由图 1 可以看出, 区域间低频振荡模式参与振荡的机组分群明显, 强相关的发电机与文献 [5] 基本相同。其中: 0.198 Hz 模式是川渝大部分机组相对其它区域机组成方向相反的大区域间振荡, 20 余台四川大机组参与该模式的振荡; 0.989 Hz 模式是四川电网攀枝花地区小区域间低频振荡模式。

3.3 不同运行条件下主振荡模式阻尼分析

取 3.2 节中 7 个区域间主导低频振荡模式中的 4 个模式对比其频率和阻尼, 结果见表 2。

表 2 不同运行条件下主导低频振荡模式比较

模 式	303潮流典型方式		检修运行方式		文献 [5] 中模式	
	f(Hz)	$\zeta(\%)$	f(Hz)	$\zeta(\%)$	f(Hz)	$\zeta(\%)$
1	0.198	8.1	0.216	6.7	0.210	2.9
2	0.417	3.2	0.411	0.5	0.408	2.7
3	0.794	12.2	0.691	8.9	0.790	10.5
4	0.989	17.2	0.918	13.7	0.943	7.8

从表 2 中可以清楚地看到, 小范围改变参数和运行条件后, 系统低频振荡频率只发生了微小变化, 这就验证了文献 [5] 所提到的“适当降低与要求取的系统主振模式相关性不大的发电机模型阶数来分析上万阶大规模实际电网”方法的可行性。

但是, 系统运行方式和发电机励磁调压系统、PSS 参数的改变对系统阻尼水平的影响很大。从表 2 可知, 303 潮流全接线典型运行方式下系统阻尼水平明显强于文献 [5] 中结果。这是因为川渝与鄂的联络线增加了 2 条(万县一龙泉, 鄂渝第二通道: 鄂恩施 500 kV 输电干线), 改变了川渝鄂联络线潮流重载情况。另外现在 303 作业下四川发电机配置的 PSS 也要多于 572 作业, 一些发电机的励磁调节器 (AVR)、PSS 参数又经测试, 要比旧参数准确。以表 2 中模式 4 为例, 强相关机组为河门口 11、12 号、攀煤 12 号等, 将新旧数据对比在表 3 中。

表 3 新旧数据 AVR 和 PSS 模型参数对比

发电机组	文中 (303潮流) 新数据		文献 [5] 旧数据	
	AVR 模型	PSS 模型	AVR 模型	PSS 模型
河门口 11	12.311	2.332	1.307	0.0
河门口 12	12.312	2.332	1.307	0.0
攀煤 11	12.313	2.333	12.319	1.345
攀煤 12	12.313	2.333	1.307	0.0
二滩 04	112.1	33.1	12.320	2.322
二滩 05	112.1	33.1	12.320	2.322

从表 2 还可以看出: 检修方式下低频振荡衰减阻尼比较全接线典型运行方式下降明显, 应该特别加以重视。阻尼下降的原因可以从检修运行方式下四川网内网架结构变化、潮流加重情况得到解释。在潮流对比表 1 中: 由于洪陈一回线停运的影响, 洪沟一渝板桥线路潮流加重 70% 由“全接线典型方式”下两回线的 236.69 (116.84 + 116.84 = 236.69) 变为一回线的 186.53。洪龙线检修退出, 谭家湾一南充的潮流加重近一半, 由 38.38 增加为 70.60。因此大检修时, 四川网架比较薄弱, 存在弱阻尼低频振荡隐患, 必

须保证有关 PSS 正常投运。

3.4 串补对主振模式阻尼的影响

仿真计算结果表明二滩一普提串补投运与否对主振模式的阻尼影响非常大,它在一定程度上较大的补偿了快速励磁调节器对系统产生的负阻尼作用,增强了全网的阻尼特性。尤其是有利于抑制四川本地低频振荡模式和于四川强相关(四川机组参与较多且参与性很强)的模式,退二普串补运行方式下主导低频振荡模式阻尼变化见表 4。

表 4 投、退串补对主振模式阻尼的影响

模式	主振频率	有串补时阻尼(%)	无串补时阻尼(%)
1	$f=0.198\text{ Hz}$	8.10	5.72
2	$f=0.794\text{ Hz}$	12.18	5.29
3	$f=0.989\text{ Hz}$	17.20	3.54
4	$f=0.417\text{ Hz}$	3.24	3.99

由表 4 可见,二普串补提高系统的阻尼水平主要是通过部分主振模式起作用,如表中 1、2、3 模式,串补投运后阻尼都成倍提高,而其它模式阻尼影响不大,至出现模式 4 反而下降,这是因为前三个模式相关因子排序靠前四川机组参与机组较多,而大区域间振荡模式 4 有许多山东、湖南机组与之强相关(见表 5),相关因子表中前 7 位都是鲁、湘发电机组。

表 5 0.417Hz 模式参与发电机相关因子表

母线名	实部	虚部	相关因子
鲁菏泽厂 5 号	0.012283	0.000955	0.025065
鲁邹县厂 7 号	0.008602	0.005055	0.014106
湘湘潭 B03	-0.004055	-0.004114	0.007176
湘金厂 07	-0.003757	-0.004302	0.00556
鲁邹县厂 5 号	0.008138	0.005049	0.005448
鲁邹县厂 6 号	0.008138	0.005049	0.005448
鲁费县厂 1 号	0.008643	0.00541	0.005276
川二滩 #04	0.002578	0.001457	0.004982
川二滩 #05	0.002578	0.001457	0.004982
湘华岳 02	-0.004416	-0.001873	0.004768
鲁华德厂 6 号	0.006995	0.004422	0.004666

3.5 低频振荡模式的二阶非线性与 PSS 配置

PSS 仍然是抑制低频振荡最经济有效的措施。目前四川电网绝大部分主力发电机组,特别是主力水电机组都安装了 PSS 装置,这也是联网后四川电网未发现极弱阻尼或负阻尼低频振荡模式的原因。若尝试退去强相关机组的 PSS 仿真试验,主振模式阻尼值都将减半,如:0.198 Hz 和 0.989 Hz 模式的阻尼分别减为 3.41% 和 6.29%。

多机系统中应用 PSS 抑制低频振荡必须解决的两个问题是 PSS 选址和参数的协调优化。只有在关

键的发电机上安装了恰当参数的 PSS 对低频振荡才会有较好的抑制效果。但是由电力系统二阶解析解可以看出,系统参数与低频振荡模式以及模式与模式之间存在非线性相关作用,因此,研究低频振荡问题必须将传统的线性化小干扰分析同计及二阶非线性相关作用的大干扰分析相结合,可以更有效地找到低频振荡的根源,是对常规 PSS 配置的非线性修正。

在四川电网退 PSS 仿真试验过程中,发现在一些一阶相关性较小的机组(如:二滩、河门口、龚嘴),其 PSS 的投入、退出对四川电网动态稳定的影响比相关性强的机组还要大,特别是龚嘴机组还存在 PSS 逆调现象。上述情况可以从二阶解析解得到合理解释,因为此时这些机组的 2 阶相关因子大于线性强相关机组的 1 阶相关因子,由非线性主导系统的动态特性。以表 1 中模式 4 为例说明:参与振荡的发电机相关因子排序见表 6,攀煤机组一阶相关因子最大,其次为二滩机组,河门口机组最小。如果河门口机组 PSS 退出,该模式的频率变化不大,阻尼比由 17.2% 下降到 12.3%,对主振模式影响比较大;特别是河门口 12 号的参与性是很强的,由原来参与振荡的从属机组变为振荡的主导机组。

表 6 0.989Hz 模式参与发电机相关因子表

母线名	实部	虚部	相关因子
川攀煤 #11	-0.005967	-0.027009	0.197556
川攀煤 #12	-0.005967	-0.027009	0.197556
川二滩 #02	-0.00154	0.004448	0.021409
川二滩 #03	-0.00154	0.004448	0.021409
川二滩 #06	-0.00154	0.004448	0.021409
川二滩 #01	-0.00154	0.004448	0.021406
川紫坪铺 #02	-0.003156	-0.007569	0.016182
川紫坪铺 #03	-0.003156	-0.007569	0.016182
川紫坪铺 #04	-0.003156	-0.007569	0.016182
川紫坪铺 #01	-0.002386	-0.007208	0.014195
川二滩 #04	0.000205	0.002259	0.007173
川二滩 #05	0.000205	0.002259	0.007173
川河门口 #11	0.001445	0.005823	0.00615
川河门口 #12	0.003691	0.001766	0.004088

5 结论

(1) 结合大区互联条件下四川实际电网的特点揭示了其存在弱阻尼低频振荡问题的原因。通过对大区互联背景下四川电网低频振荡问题再分析,求出了与四川电网相关的七个区域间主振模式。

(2) 四川电网阻尼总体水平较文献 [5] 中结果有

一定改善。原因是四川电网已形成 500 kV 环网结构,改变了电力汇集过于集中和潮流重载状况;南部还通过洪沟—陈家桥和北部南充—万县两个通道、三回 500 kV 线路与重庆电网相连,并经三峡—万县双回 500 kV 线路与华中电网联网,建立了“川电外送”通道。

(3)励磁系统的负阻尼作用仍然是互联电网发生低频振荡的主要原因。从二滩等机组励磁系统、PSS新、旧数据的计算对比来看,新数据要优于旧数据,很好的抑制了四川电网低频振荡,应该加强 AVR 及 PSS 试验管理工作,确保 PSS 试验整定参数准确。检修方式下主网线路潮流明显加重,应特别注意乐山、攀枝花、川北地区,必须保证二滩、龚嘴等重要机组 PSS 正常投入运行。临邛接入的水电机组和川西北水电机组 PSS 的配备是不强的,新建石雅崇水电送出通道存在弱阻尼低频振荡隐患。

(4)二普串补在一定程度上较大的补偿了快速励磁调节器对系统产生的负阻尼作用,特别是对与四川强相关的大区域间主导低频振荡模式和四川本地模式的抑制效果最有效。

(5)运用由多机电力系统二阶解析解推得的二阶相关因子,包含了系统参数与模式间二阶非线性信息,对理解和认识“为什么小干扰稳定计算中一阶相关因子较小的机组上加装 PSS 反而对主振模式影响

最大”以及“PSS 逆调现象”有指导意义。

参考文献

- [1] 吴敬儒,徐永禧. 中国互联电网的发展 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1—3.
- [2] 朱方,赵红光. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响 [D]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1—7.
- [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.
- [4] 余贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响 [D]. 中国电机工程学报. 2005, 25(11): 6—11.
- [5] 邓集祥,贺建明,姚天亮. 大区联网条件下四川电网低频振荡分析 [J]. 电网技术, 2008, * * * * * 已录用 * * * * *.
- [6] 四川“十一五”电网规划及远景展望 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(1): 5—7.
- [7] 邓集祥,赵丽丽. 主导低频振荡模式二阶非线性相关作用的研究 [D]. 中国电机工程学报. 2005, 25(7): 75—80.
- [8] 邓集祥,叶静,郎斌斌,王俊胜. 计及二阶非线性特性的 PSS 配置的研究 [J]. 电力系统自动化. 2008, * * * * * 已录用 * * * * *.
- [9] 邓集祥,涂进,陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别 [J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36—41.
- [10] 张晓明,庞晓艳,陈苑文,等. 四川电网低频振荡及控制措施 [J]. 中国电力, 2000, 33(6): 36—39.

(收稿日期: 2008—06—15)

(上接第 9 页)

2003 年,美国能源部提出了构建安全可靠电网的“Grid2030 规划”。该计划旨在采用先进的材料技术、超导技术、电力电子技术和控制技术、广域测量技术、实时仿真技术、储能技术、可再生能源发电技术、微型燃气轮机发电技术等构建全美骨干电网、区域性电网、地方电网和微型电网(分布式电力系统)等多层次的电力网络,以保障大电网的安全性、稳定性,供电的可靠性及电能质量。

6 结束语

加快水电、太阳能、风能、生物质发电、沼气的开发利用,提高可再生能源在能源结构中的比重,解决偏远地区无电人口供电问题,改善农村生产、生活条件,推行有机废弃物的资源化利用,推进可再生能源技术的产业化发展,分布式能源系统微型电网技术将

发挥重要作用。微型电网的潜在用户和市场前景有:城市发展过程中的小区新能源、环保改造项目;大学校园的环保象征、试验研究项目;为工业区提供高品质稳定电力;医院、宾馆等高耗能单位的供电、供热;孤岛等边远地区的供电、供热;医院、银行、数据中心等对供电可靠性要求很高的公共设施;新农村建设中的生态能源项目等。

四川是中国西部最重要的大省,也是中国最大的能源资源大省,在高度重视特高压、超高压电力系统的同时,也要在能源规划、电力系统规划、建设、运行时高度注意新兴发展的微型电网技术和相应的系统。

当前特高压大电网的发展和分布能源微型电网的研究开发已形成两个不同的亮点。中国的“西电东送”和“南北互供”的大电网资源优化配置的优势,毋庸置疑。但是具有联动效应的大电网,却存在产生大面积停电的巨大风险。防止级联跳闸,缩小停电范围,主动解列,灵活分区,分布式供能,微型电网及协调控制,已成为当前研发的热点。

(收稿日期: 2008—06—15)