

DOI: 10.7667/PSPC151228

蒙西电网动态稳定问题分析及稳定措施研究

程浩, 冯艳虹, 张道农, 艾琳, 王绍德

(华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: 为解决蒙西电网运行中日益严重的动态稳定问题, 先以“单机-无穷大”系统为例分析了系统发生低频振荡的机理。再针对蒙西电网运行中出现的动态稳定问题, 从改善电网结构、调整输电方式、优化 PSS 参数等方面提出了解决系统低频振荡的措施。并采用电网调度数据对所提出的各种措施进行了仿真计算分析。计算结果表明所提出的措施对于抑制蒙西电网低频振荡现象效果显著, 可有效地提高蒙西电网的动态稳定水平。最后再结合工程投资、建设工期等实际问题, 对上述措施进行了简要比较, 并给出优选建议。

关键词: 互联电网; 动态稳定; 低频振荡; 机理; 措施

Analysis of dynamic stability issues of West Inner Mongolia power grid and research on its control measures

CHENG Hao, FENG Yanhong, ZHANG Daonong, AI Lin, WANG Shaode
(North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: The dynamic stability issue of West Inner Mongolia Power Grid becomes increasingly severe. To solve this problem, the paper uses "single machine-infinite bus" system as an example for analyzing the mechanism of low frequency oscillation of the system. Aiming at the dynamic stability issues of West Inner Mongolia Power Grid, it proposes the solutions to lower frequency oscillation of the system, including improving power grid structure, adjusting power transmission mode and optimizing parameters of PSS. Using dispatching data of power grid to do simulation calculations, this paper analyzes the proposed solutions. The calculation results show that the proposed solutions have pronounced effect on restraining the low frequency oscillation of Power Grid, can efficiently improve the dynamic stability of Power Grid, and are actually operational in engineering. Finally, in combination with actual issues of investment and duration in engineering construction, this paper gives the brief comparison and selected advices on all solutions above.

Key words: interconnected power grid; dynamic stability; low frequency oscillation; mechanism; measures

0 引言

目前蒙西电网主要通过“汗海-沽源”双回线和“丰泉-万全”双回线两个送电通道向华北电网负荷中心送电。多年来“西电东送”一直未增加新的送电通道, 而送电容量却逐步增大, 导致外送通道上热稳定、暂态稳定与动态稳定问题共存, 而动态稳定问题尤为突出, 并逐步演变成成为蒙西电网继续发展的瓶颈。运行方式显示在特高压大容量北送方式下, 特高压解列跳闸后蒙西外送增加, “蒙西-山东”振荡模式变弱, 会引起蒙西对山东机组功角及相关线路功率的振荡。

为解决蒙西电网动态稳定问题, 提高其“西电东送”断面的输电能力, 本文从蒙西电网动态

稳定问题发生的根本原因入手, 对蒙西电网实际运行中出现的动态稳定问题进行实例分析, 进而提出解决措施。仿真分析结果表明本文提出的措施可有效提高蒙西电网的动态稳定水平, 并且在工程上具备可操作性, 对蒙西电网的发展规划具有较好的指导作用, 也可作为电网部门运行、操作决策的参考借鉴依据。

1 电网动态稳定问题的现状

华北电网在 2008 年前后开始对系统运行中表现出来的动态稳定问题展开研究, 最早是在蒙西电网“西电东送”中发现蒙西电源外送容量受电网动态稳定因素限制, 体现在系统易发生低频振荡现象。在蒙西电网内部主网架进一步加强后

(加强后的蒙西主网架如图 1 所示), 该问题并未真正地解决, 电网低频振荡现象依然存在, 其中, “蒙西-山东” 区间振荡模式比较严重, 已经演变成决定蒙西电网动态稳定水平的主要模式, “特高压北送-山东送电”、“特高压解列-山东送电” 等多种方式下, “蒙西-山东” 模式的阻尼比已接近或低于《电力系统安全稳定计算技术规定》(下文简称《规定》) 的要求值, 即“在正常方式下, 区域振荡模式以及与主要大电厂、大机组强相关的振荡模式的阻尼比宜达到 0.03 以上; 故障后的特殊运行方式下, 阻尼比至少应达到 0.01~0.02”。



图 1 蒙西电网主网架结构示意图
Fig. 1 Main frame structure of West Inner Mongolia Power Grid

本文基于蒙西电网 2014 年度“特高压北送-山东送电”运行方式数据, 对蒙西电网的动态稳定水平现状进行仿真研究分析。在正常运行方式下, 小干扰稳定性分析程序 PSD-SSAP 的计算结果显示, “蒙西-山东” 振荡模式的阻尼比为 0.024 5; 而在“沽源-太平” I 线发生三相永久故障时, 时域仿真计算结果显示, “蒙西-山东” 振荡模式的阻尼比为 0.010 3。以上计算结果显示, 目前蒙西电网的动态稳定水平已经不能满足《规定》的要求, 急需改善。正常运行方式下小干扰稳定性分析程序计算结果如图 2 所示, 故障方式下时域仿真结果如图 3 所示。

2 电网动态稳定问题产生的机理分析

目前大型发电机普遍采用快速励磁调节器, 使自动励磁调节时间大为缩短且增益提高, 而正是由于系统中广泛配置的快速励磁系统产生的负阻尼降低了系统的阻尼, 导致系统容易发生动态稳定问题, 尤其是在潮流较重的区域联络线上容易发生低频振荡^[1-4]。本文以“单机—无穷大”系统为例, 分析发电机组加装快速励磁系统后影响系统阻尼的机理^[1], 图 4 中所示为本次分析所用的“单机-无穷大”系统图及其矢量图。

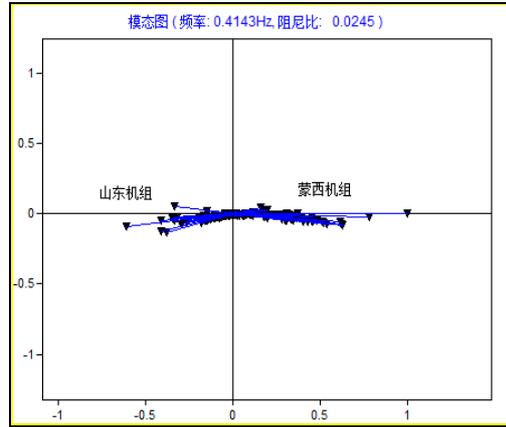


图 2 “蒙西-山东” 振荡模式
Fig. 2 Oscillatory mode shape of “West Inner Mongolia-Shandong”

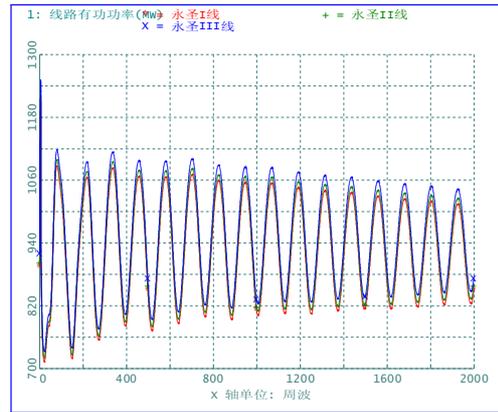


图 3 “沽太” I 线三永故障方式下“永丰”三回线路有功振荡曲线
Fig. 3 Power oscillation curve of “Yong shengyu-Feng guan” transmission lines in three phase permanent fault Operation Mode of “Guyuan-Taiping” I line

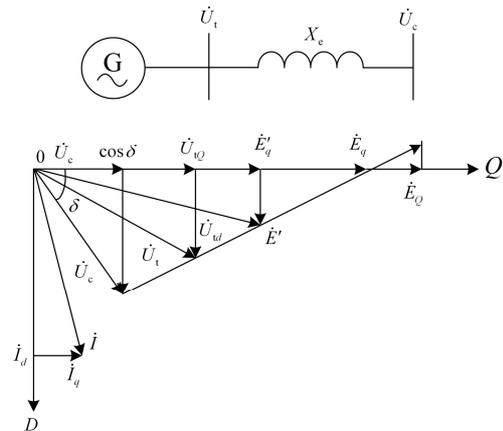


图 4 “单机-无穷大”系统及其矢量图
Fig. 4 “Single machine-infinite” system and its vector diagram

2.1 不考虑励磁调节系统的作用

在不考虑励磁调节系统作用时, 发电机电磁转矩表达式为^[5]

$$\begin{aligned}\Delta M_e &= K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E_q \\ \Delta E_q &= \frac{K_3}{1 + K_3 T'_{d0} s} \Delta E_{fd} - \frac{K_3 K_4}{+K_3 T'_{d0} s} \Delta \delta \\ \Delta U_t &= K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q\end{aligned}$$

其中, $K_1 \sim K_6$ 都是运行工况的函数, 在一定的运行方式下为常数。在发电机负荷较小时 K_5 数值为正数, 在负荷较大时因 δ_0 增大变为负数; 其余 5 个参数一般均为正数。由于不考虑励磁调节器的作用, ΔE_{fd} 为零; 令 $s = j\omega$, 则电磁转矩的表达式化简为

$$\Delta M_e = \left(K_1 - \frac{k_2 k_3 k_4}{1 + K_3^2 T_{d0}'^2 \omega^2} \right) \Delta \delta + j \frac{k_2 k_3 k_4 T_{d0}' \omega}{1 + K_3^2 T_{d0}'^2 \omega^2} \Delta E_q$$

简化如下:

$$\Delta M_e = \Delta M_{e1} + \Delta M_{e2}$$

则电磁转矩可表示为由同步转矩 ΔM_{e1} 和超前 $\Delta \delta 90^\circ$ 的阻尼转矩 ΔM_{e2} 的合成, 如图 5(a) 所示。

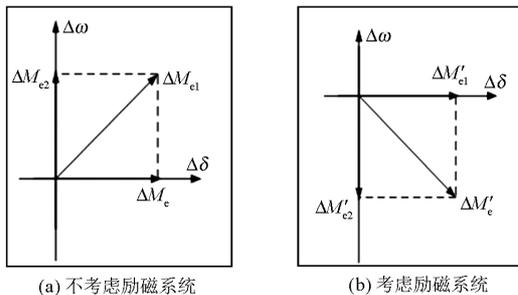


图 5 电磁转矩矢量图

Fig. 5 Vector diagram of electromagnetic torque

2.2 考虑励磁调节系统的作用

考虑机组的励磁调节系统时, 设高放大倍数快速励磁系统的传递函数为

$$G_e(s) = K_e / (1 + T_e s)$$

励磁系统的输入、输出表达式分别为

$$-\Delta U_t = -(k_5 \Delta \delta + k_6 \Delta E_q)$$

$$\Delta E_{fd} = -k_e \Delta U_t / (1 + T_e s)$$

化简并略去相对较小的项整理可得:

$$\Delta M'_e = \left[\left(K_1 - \frac{k_2 k_5 k_6 k_e^2}{k_6^2 k_e^2 + T_{d0}'^2 \omega^2} \right) + j \frac{k_2 k_5 k_e^2 T_{d0}' \omega}{k_6^2 k_e^2 + T_{d0}'^2 \omega^2} \right] \Delta \delta$$

当发电机负荷较大, K_5 变为负值, 所以阻尼转矩变为滞后 $\Delta \delta 90^\circ$ 的负阻尼转矩, 如图 5(b) 所示。又由于励磁系统增益 K_e 很大, 使得系统的负

阻尼较大, 当系统出现扰动时很容易发生低频振荡, 导致系统动态不稳定。

通过上述分析, 从根本上解释了系统中大量应用的快速励磁系统影响系统动态稳定的机理。

3 解决措施分析

低频振荡问题的产生是因为系统阻尼的减小, 对应的抑制手段就是增加系统正阻尼。本文将从一次系统和二次系统两个方面考虑切实可行的、加强系统正阻尼的措施, 并通过仿真计算校验各种措施的实际效果。

3.1 二次系统措施

电力系统稳定器 PSS 是一种附加励磁控制, 其实质是给励磁系统提供一个附加信号, 通过励磁系统去增加发电机的阻尼转矩, 提高系统的动态稳定性, 但 PSS 不会降低励磁系统电压环的增益, 即不影响励磁控制系统的暂态性能。目前, 通过加装 PSS 调节系统的动态稳定性已经成为了一个最基本、最常规的控制手段^[5-8]。

(1) 加装电力系统稳定器 PSS

在实际运行中, 为给系统留有一定的稳定裕度, 蒙西电网有多台发电机组的 PSS 处于退出运行状态, 并将其作为一个调节电网运行的控制手段。为校验加装 PSS 装置对系统动态稳定的作用, 本文选择将其中 19 台大型机组的 PSS 投入运行, 同时完善 PSS 的参数配置, 在现状运行数据的基础上形成新的蒙西电网案例分析数据。

对新案例分析数据进行小干扰稳定计算, 计算结果如图 6 所示, 结果显示“蒙西-山东”振荡模式的阻尼比由 0.024 5 提高到 0.039 2, 提高幅度达到 60%; 而与此相关的其他振荡模式未出现趋坏的变化, 即不会影响到其他模式的稳定水平。

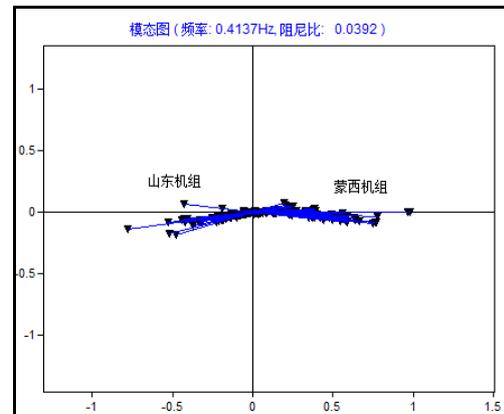


图 6 加装 PSS 后“蒙西-山东”振荡模式图

Fig. 6 Oscillatory mode shape of “West Inner Mongolia-Shandong” when installation PSS

设置“沽源-太平”I线三相永久故障进行时域仿真,此时蒙西电网“永圣域-丰泉”三回线路功率振荡曲线如图7所示,与图3相比,加装PSS后该三回线路功率振荡曲线在更短的时间内衰减到较小的幅值。进行Prony分析,得出该振荡模态下的阻尼比为0.025,相比于现状数据故障方式下的计算结果0.0103,阻尼比增大一倍。

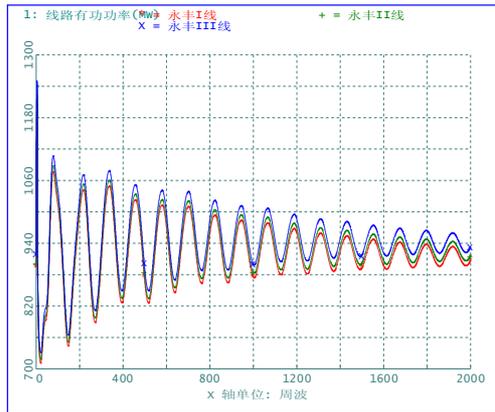


图7 加装PSS后“沽太”I线三永故障方式下永丰三回线路有功振荡曲线

Fig. 7 Power oscillation curve of “Yong shengyu-Feng quan” transmission lines in three phase permanent fault operation mode of “Guyuan-Taiping” I line when installation PSS

(2) 优化电力系统稳定器PSS参数

随着系统网架结构、电源布点、负荷性质等因素的变化,PSS设计参数适应性可能会有所降低,其抑制振荡的效果也会下降。在当前电网实际运行条件下,如何找到适应性较差的关键机组或关键参量并进行参数优化,较为快速和有效的方法是借助于参与因子和特征值的灵敏度指标。限于篇幅,针对特征值灵敏度指标的原理不再赘述,可参见文献[9-11]。基于参与因子和灵敏度指标确定需要进行PSS参数优化机组的原则是选取关键模式下参与度和灵敏度均较高的机组,理论上PSS参数优化后该机组在该模式下的参与度和灵敏度指标均降低。

基于上述原则,确定的需要优化PSS增益的机组见表1所示。对表1中确定的11台机组的PSS增益进行优化,按DL/T843-2010中最大增益的限制条件,优化后的机组PSS增益均未超过允许最大增益。

对上述机组PSS增益优化后的数据进行小干扰程序分析,结果表明“蒙西-山东”振荡模态下系统的阻尼比由0.0392大至0.0567,增加了45%。

表1 PSS增益需优化的机组及优化结果
Table 1 Thermal power units of need optimizing PSS gain and optimization results

机组	机组参与因子	元件参数灵敏度	增益优化结果
1#机	0.774 4	0.239	2.67
2#机	0.583	0.157 3	2
3#机	0.632 2	0.125	2.67
4#机	0.592 4	0.119 7	2.67
5#机	0.966 8	0.050 8	3.67
6#机	0.979 1	0.047 3	2.67
7#机	0.591 5	0.045 1	6
8#机	0.755 4	0.044 1	6.67
9#机	0.755 4	0.044 1	6.67
10#机	0.775	0.042 3	6.67
11#机	0.552 7	0.036 9	7

大扰动方式下,设置“沽源-太平”I线三相永久故障,计算结果如图8所示,在上述故障方式下“永圣域-丰泉”三回线功率振荡幅值比图7明显降低;同时Prony分析结果显示,该模态下的阻尼比约为0.0390,相比图7的Prony计算结果0.025,阻尼比明显增大。

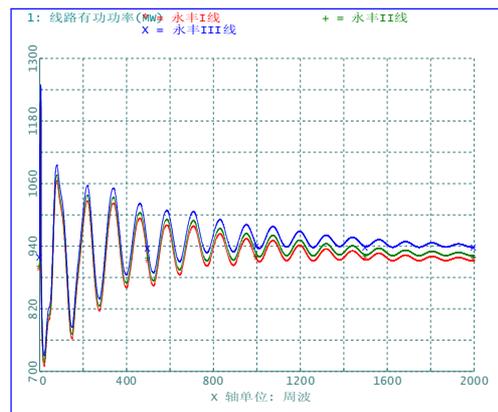


图8 优化PSS增益后“沽太”I线三永故障方式下永丰三回线路有功振荡曲线

Fig. 8 Power oscillation curve of “Yong shengyu-Feng quan” transmission lines in three phase permanent fault operation mode of “Guyuan-Taiping” I line when optimizing PSS gain

本文基于参与因子和传递函数的灵敏度指标对PSS相位补偿进行了优化,鉴于相位补偿参数优化后对系统动态稳定的提升作用微小,工程中应用的实际效果和意义有限,本文不再展开详述。

3.2 一次系统措施

(1) 加强网架结构

蒙西电网“西电东送”通道主要由呼包断面、

呼丰断面以及“汗海-沽源”双回、“丰泉-万全”双回外送二通道组成, 一直以来蒙西电网“西电东送”通道上电力流都运行在极限水平, 负载较重, 因此可以考虑加强蒙西电网“西电东送”通道联络线以降低线路负载、增强系统阻尼。加强方案考虑如下:

方案 I: 加强蒙西电网内部通道, 新建大路~集宁东双回 500 kV 线路;

方案 II: 加强蒙西电网外送通道, 新建宁格尔~清苑双回 500 kV 线路。

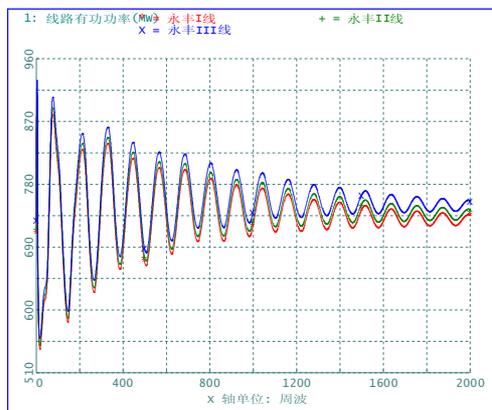
在加装 PSS 后的蒙西电网数据的基础上, 对采取上述两方案的效果进行仿真分析。正常运行方式下进行小干扰计算, 计算结果见表 2 所示, 结果显示决定蒙西电网动态稳定水平的“蒙西-山东”振荡模式的阻尼均有不同程度的增加, 方案 I 中系统阻尼比由 0.039 2 增大至 0.044, 提高了 12%; 方案 II 中系统阻尼比由 0.039 2 增至 0.068, 提高了 73%。设置“沽源-太平”I 线三相永久故障, 进行大扰动时域仿真分析, 仿真结果见图 9 所示, 结果显示增强系统联络线对相关线路功率振荡的“第一摆”有明显的抑制作用, 方案 I 下“第一摆”幅值降低约 100 MW, 方案 II 下“第一摆”幅值降低约 180 MW。

由图 9 也可看出, 按方案 I, 在加强蒙西电网内部送电通道网架结构后, 在大扰动条件下系统仍表现为动态稳定, 线路功率曲线经过十几次衰减振荡后趋稳, 与加强联络线前相比, 振幅和

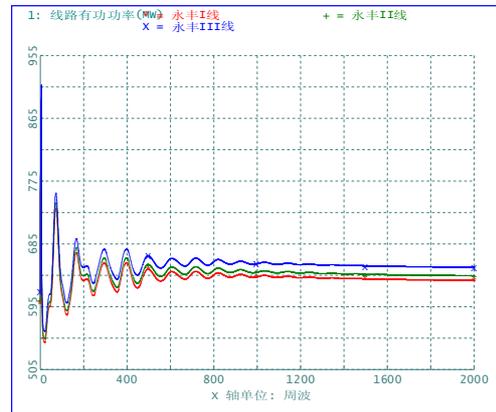
表 2 加强网架后小干扰稳定分析结果

Table 2 Result of small signal stability analysis when strengthen grid

	加装 PSS 数据	方案 I	方案 II
阻尼比	0.039 2	0.044 0	0.068 0



方案 I: 加强蒙西电网内部送电通道



方案 II: 加强蒙西电网外送通道

图 9 加强联络线后“沽太”I 线三永故障方式下“永丰”三回线路有功振荡曲线

Fig. 9 Power oscillation curve of “Yong shengyu-Feng quan” transmission lines in three phase permanent fault operation mode of “Guyuan-Taiping” I line when strengthen tie line

振荡次数均有减小; 而按照方案 II, 在加强外送通道的网架结构后, 实施同样大扰动条件下系统表现为暂态稳定, 线路功率曲线的振荡很快就衰减且回归稳定。由此可见, 在不同的位置加强电网结构, 提高电网动态稳定水平的效果是不同的, 在关键位置加强网架结构对系统动态稳定水平会有质的提高。

(2) 采用背靠背直流输电技术

随着直流技术和换流设备的发展, 直流输电技术在远距离输电领域的优势已经获得广泛的共识^[12-13]。直流输电技术的范畴内, 背靠背直流输电技术也已经成功应用到电网运行中, 例如东北电网通过背靠背直流输电技术向华北电网送电。

背靠背直流输电技术的优势是可以利用已建成的线路, 不需要新建直流线路, 同时也可有效地隔断互联交流电网间的相互影响, 有利于解决远距离大容量送电线路上的稳定问题。

本文中为了隔断蒙西电网和华北主网, 尤其是和山东电网之间的相互影响, 考虑将“汗海-沽源”双回线、“丰泉-万全”双回线均改为背靠背直流送电方式, 分别在汗海站、丰泉站侧新建含有整流设备及逆变设备的背靠背换流站, 实现蒙西电网与华北电网的非同步互联。

如表 3 及图 10 所示, 蒙西电网若将现有的外送二通道调整为背靠背直流送电, 小干扰稳定分析结果显示, 影响蒙西电网动态稳定水平的“蒙西-山东”振荡模态将消失, 而与华北电网相关的其他各振荡模态的阻尼比均未出现恶化, 其中部

分模态的阻尼比反而略有提高,这说明采取直流送电方式时,蒙西电网的动态稳定水平将会有明显的提升。表3及图10中,1#、18#、31#、37#及71#模态分别表示“华北-华中”、“蒙西-山东”、“四川河南山西-华中山东”、“山东-华北”、“蒙西-蒙西”振荡模态。

表3 直流输电方式小干扰稳定计算结果
Table 3 Result of small signal stability analysis using DC transmission

	交流互联	直流互联
11#	0.09	0.115
18#	0.039	-
31#	0.141	0.141
37#	0.091	0.097
71#	0.049	0.049

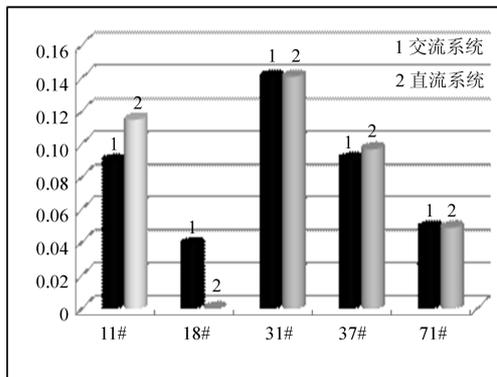


图10 蒙西电网与华北电网交直流互联方式下各振荡模态阻尼比变化

Fig. 10 Difference of damping ratio of oscillatory modes between using AC transmission and DC transmission

4 结论和建议

针对电网运行中出现的动态稳定问题,本文提出多方案解决措施,并仿真校验了各措施的有效性,得出以下结论、建议:

(1) 加装 PSS 装置对解决系统存在的动态稳定问题是较为有效且最为经济的措施。在现役机组上加装 PSS 装置后电网总体动态稳定水平会有显著的提高;对机组 PSS 增益参数进行优化,在一定程度上也可有利于提高系统动态稳定水平。

对于由系统动态稳定问题影响范围相对较小或导致电网输电容量降低幅度不大的情况,说明输电网络具备一定的动态稳定裕度,可优先考虑采取加装 PSS 或对现役 PSS 参数进行优化等措施来提高系统动态稳定水平,实施相对较为容易,基本能够满足预期输电需要,且投资较低,仅为

加网架结构费用的 20%~30%。

(2) 加强、改善电网结构是解决系统动态稳定问题最根本的措施,在影响电网动态稳定水平的关键制约断面加强电网结构,对系统动态稳定会有质的提高;若在关键断面采用直流输电则会彻底消除该振荡模态。

对于由系统动态稳定问题导致电网输电容量大幅度降低、对电网发展及保障供电构成较大影响的情况,建议采取在电网关键制约断面加强或调整改善网架结构的措施,虽然建设周期长、投资费用高,但是会从根本上解决制约输电能力的动态稳定问题。

参考文献

- [1] DEMELLO F P, CONCORDIA C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(4): 316-329.
- [2] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定型的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.
ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.
- [3] 陈刚, 何潜, 段晓, 等. 电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 17-22.
CHEN Gang, HE Qian, DUAN Xiao, et al. Overview on analysis and control of low frequency oscillation in power systems[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(3): 17-22.
- [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[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 6-11.
YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [5] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 杨培宏, 刘文颖, 张继红. PSS 和 TCSC 联合抑制互联电网低频振荡[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 11-16.
YANG Peihong, LIU Wenying, ZHANG Jihong. Restraining low frequency oscillation of interconnected power grid using PSS and TCSC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 11-16.
- [7] 刘书铭, 李陈营, 李琼林. 电力系统串联谐波谐振

- 的特性分析与灵敏度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 21-27.
- LIU Shuming, LI Chenying, LI Qionglin. Characteristics analysis of power system series harmonic resonance and sensitivity calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 21-27.
- [8] 李雪亮, 张杰, 王云鹏. 考虑受端励磁系统的交直流稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 9-15.
- LI Xueliang, ZHANG Jie, WANG Yunpeng. Stability analysis of HVDC systems considering effects of excitation voltage control of receiving system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 9-15.
- [9] 周二专, 王宗淦, 陈寿菽. 多机电力系统 PSS 设计综合理论和方法研究[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(5): 28-36.
- ZHOU Erzhuang, WANG Zonggan, CHEN Shousun. Theory and method for designing and synthesizing pss in multimachine power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1988, 8(5): 28-36.
- [10] 刘涛, 宋新立. 特征值灵敏度方法及其在电力系统小干扰稳定分析中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 82-87.
- LIU Tao, SONG Xinli. Eigenvalue sensitivity and its application in power system small signal stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 82-87.
- [11] 尹波, 庞松龄, 杨眉. 基于阻尼灵敏度指标的 PSS 参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 28-32.
- YIN Bo, PANG Songling, YANG Mei. Optimization of PSS parameters based on damping sensitivity indices[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 28-32.
- [12] 李生福, 张爱玲, 李少华. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
- LI Shenfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [13] 丁明, 田龙刚, 潘浩. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.

收稿日期: 2015-07-15; 修回日期: 2015-10-12

作者简介:

程浩(1984-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计; E-mail: chenghao@ncpe.com.cn

冯艳虹(1974-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计;

张道农(1961-), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向为继电保护及安全自动装置的设计与研究以及大型工程项目的管理工作。

(编辑 葛艳娜)