

# 华中电网 WAMS 实测区域低频振荡仿真

董明齐, 杨东俊, 黄涌, 周宏

(华中电网有限公司技术中心, 湖北省 武汉市 430077)

## Simulation of Regional Low Frequency Oscillation Based on Data Measured by WAMS of Central China Power Grid

DONG Ming-qi, YANG Dong-jun, HUANG Yong, ZHOU Hong

(Technology Center of Central China Grid Company Limited, Wuhan 430077, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** During the icing disaster occurred in 2008, the wide area measure system (WAMS) of Central China power grid had been recorded many times of low frequency oscillation. In this paper, taking the WAMS-measured typical regional low frequency oscillation accident occurred at 03:31:39, January 21st, 2008 for example, by use of power system analysis software package (PSASP) v.6.25 the simulative analysis of this accident is performed, and by means of stability calculation in time domain and frequency domain this accident is reproduced. Based on the selected EMS, WAMS-measured operation mode and recorded data, the power flow, the voltage and the static and dynamic characteristics of low frequency oscillation are simulated; the reason causing low frequency oscillation, the features of oscillation and suppression measures are analyzed, meanwhile, the related parameters of static and dynamic model as well as the engineering confidence level of calculation tool are checked to offer reference for power system simulative calculation. Besides, the analysis results are available for reference to the production operation and development planning of Central China power grid.

**KEY WORDS:** power system; Central China power grid; low frequency oscillation; wide area measure system (WAMS); simulation

**摘要:** 2008年冰灾期间, 华中电网广域测量系统(wide area measure system, WAMS)多次记录到低频振荡事件。文中以1月21日03:31:39 WAMS实测的典型区域低频振荡事件为例, 利用电力系统分析综合程序6.25对其进行了仿真分析, 通过频域和时域稳定计算对其进行了重现。结合选定的能量管理系统、WAMS实测运行方式及其录波数据, 对潮流电压及低频振荡的静态和动态特性进行了仿真, 分析了低频振荡产生的原因、振荡特点及其抑制措施, 为华中电网的生产运行和发展规划提供了参考, 同时对有关静态及动态模型参数和计算工具的工程可信度进行了校核, 为电力系统的仿真计算提供了借鉴。

**关键词:** 电力系统; 华中电网; 低频振荡; 广域测量系统(WAMS); 仿真

## 0 引言

2008年1月11日—2月6日, 持续低温、雨雪、冰冻造成华中电网大量输电线路覆冰、舞动, 引发多起跳闸及多处倒塔断线事故, 华中电网多次记录到系统发生低频振荡。本文选取冰灾期间华中电网广域测量系统(wide area measure system, WAMS)记录的波及范围最广、振荡幅度最大的1月21日03:31:39区域低频振荡事件进行分析和研究。针对振荡发生前的系统实测运行方式进行潮流电压仿真模拟, 重现低频振荡发生前华中电网的运行方式, 并在此基础上进行小干扰稳定和暂态稳定仿真计算, 通过对比相量测量单元(phasor measure unit, PMU)录波数据与仿真计算结果, 调整发电机组励磁系统及电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)模型参数, 对仿真计算结果与WAMS实测记录结果进行逼近, 基本重现了华中电网WAMS实测的区域低频振荡<sup>[1-8]</sup>。

本文将基于WAMS实测的录波数据, 通过仿真计算校核发电机组励磁系统、PSS等动态模型参数的准确度和计算分析工具的工程可信度, 揭示电网的真实动态特性, 可避免直接进行大扰动试验带来的风险, 为电网低频振荡的辨识控制、输电能力的提高和安全稳定运行提供坚实的技术支撑<sup>[9-15]</sup>。

## 1 WAMS 实测区域低频振荡特性分析

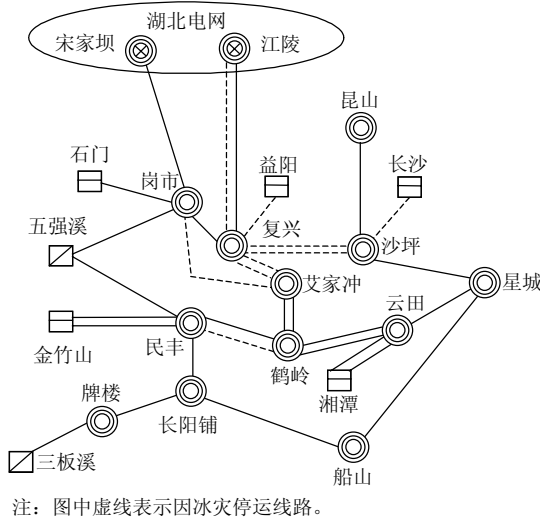
### 1.1 区域低频振荡简介

2008年1月21日03:31:39华中电网WAMS在五强溪电厂、岗市变、江陵换流站、斗笠变电站、

姚孟电厂、邵陵变等 14 个不同区域的厂站记录到有功功率低频振荡, 振荡频率为 0.41~0.44 Hz, 其中以湖南电网五岗线、五民线有功功率振荡幅度最大, 振荡功率达 500 MW。此次低频振荡主要波及湖南、湖北、河南 3 省电网, 是目前华中电网 WAMS 所监测到的覆盖面积最大的区域低频振荡。

### 1.2 低频振荡发生前系统运行方式概述

低频振荡发生前系统实测运行方式下(取振荡发生前 1 min 即 1 月 21 日 03:30 方式), 华中电网多条 500 kV 输电线路因冰灾故障跳闸停运, 其中湖南电网最严重。湖南 500 kV 电网结构如图 1 所示。



注: 图中虚线表示因冰灾停运线路。

图 1 湖南 500 kV 电网结构

Fig. 1 Diagram of Hunan 500 kV power grid

1 月 21 日 03:30 系统实测运行方式如下: 华中电网与华北电网、南方电网解网; 华中电网与华东电网通过湖北葛洲坝—上海南桥 500 kV 直流、湖北龙泉—上海政平 500 kV 直流联网(湖北宜都—上海华新 500 kV 直流停运), 华中送华东 500 MW; 华中电网与西北电网通过河南灵宝—陕西罗敷 220/330 kV 背靠背直流线路联网, 西北送华中 360 MW; 华中电网内, 鄂豫通过樊白双回和孝嵯双回联网, 豫送鄂 470 MW, 鄂湘通过葛岗线和江复 II 回线联网(江复 I 回线停运), 鄂送湘 400 MW, 鄂赣通过磁南线联网(咸梦线停运), 鄂送赣 360 MW, 鄂渝通过万龙双回和张恩双回联网, 鄂送川渝 1300 MW。总体上, 华中电网区域间、省间及其各省内电网的运行潮流较轻。

### 1.3 低频振荡特性分析

根据华中电网 WAMS 记录的各厂站 PMU 录波数据, 1 月 21 日 03:31 WAMS 实测湖南、湖北及河南 500 kV 电网的低频振荡曲线分别如图 2~4 所示。

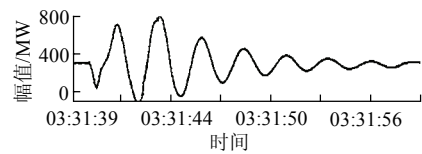


图 2 WAMS 实测湖南电网五岗线有功功率振荡曲线  
Fig. 2 Curves of active power recorded by WAMS on Wuqiangxi-Gangshi line of Hunan power grid

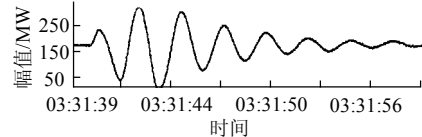


图 3 WAMS 实测湖北电网斗江一线有功功率振荡曲线  
Fig. 3 Curves of active power recorded by WAMS on Douli-Jiangling line of Hubei power grid

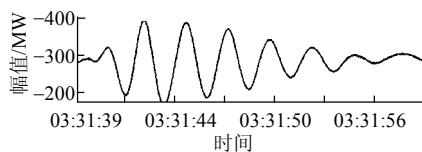


图 4 WAMS 实测河南电网邵祥线有功功率振荡曲线  
Fig. 4 Curves of active power recorded by WAMS on Shaoling-Xiangfu line of Henan power grid

通过分析 WAMS 实测有功功率振荡曲线可知, 振荡主要沿着湖南(湘)—湖北(鄂)—河南(豫)电网的路径传播, 主要波及湘鄂豫 3 省电网, 振荡传播至江西及川渝电网时已明显衰减; 所有振荡基本同步即具有相同的振荡频率; 湖南电网的五强溪—岗市—民丰地区振荡幅度最大, 为全网振荡中心, 振荡功率达 500 MW, 由于系统的阻尼作用, 由湘—鄂—豫传播时振荡逐渐衰减, 振荡持续 5 个周波左右即趋于平息。

WAMS 实测的湘—鄂—豫振荡主传输通道的振荡周波、最大振幅及振荡功率如图 5 所示。(此处最大振幅指振荡最大值与最小值之间的峰谷差, 振荡功率指相对于稳态传输功率的最大振荡功率)。

由 Prony 分析得到, 2008 年 1 月 21 日 03:31

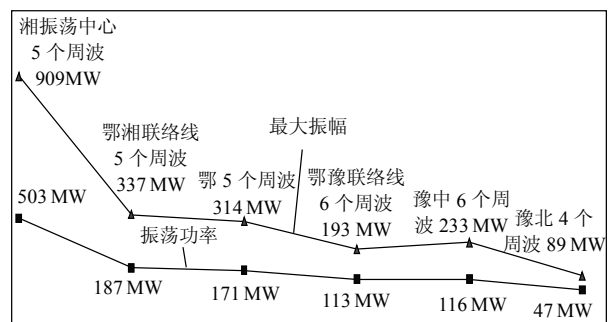


图 5 WAMS 实测湘—鄂—豫 500 kV 电网振荡传输通道示意图

Fig. 5 Illustration of oscillation transmission channel recorded by WAMS from Hunan to Hubei to Henan 500 kV power grid

主要是振荡频率为 0.41 Hz、阻尼比为 0.101 左右的区域低频振荡。

### 2 区域低频振荡的仿真分析

#### 2.1 概述

首先严格按照华中网调实测的负荷水平、开机方式(500 kV、220 kV 及 110 kV 系统的主力发电机组均按实际发电开机)、网络拓扑结构、无功补偿设备投运、各省间及省内主要 500kV 联络断面交换功率、电压和下网功率进行控制，仿真重现低频振荡事件发生前系统的运行方式。根据 WAMS 实测记录，详细模拟网络取为华中湘豫鄂赣渝 5 省(市)电网。基于低频振荡发生前的系统实测运行方式，分别进行小干扰稳定和暂态稳定仿真计算分析<sup>[2-3]</sup>。发电机采用 5 阶详细模型，考虑励磁系统、调速系统及 PSS 的作用；负荷采用感应电动机模型，其中河南、江西电网恒阻抗比为 50%，湖南、湖北电网为 35%，川渝电网为 60%。

#### 2.2 小干扰稳定分析

本节仿真首先基于冰灾期间华中网调调试数据，其中部分发电机组励磁及 PSS 模型参数仍为典型数据。小干扰稳定计算结果表明，在该方式下，华中电网内存在一个湖南—河南区域低频振荡模式，振荡频率为 0.567 Hz，衰减阻尼比为 0.0514，该振荡模式及其模态图分别如表 1 和图 6 所示。

由图 6 可以看出，该湖南—河南区域低频振荡模式的强相关机组集中在湖南电网，排在前三位的最强相关机组为 500 kV 湘潭 3 号机、金竹山 8 号机、三板溪 4 号机，湖南电网 220 kV 及以下发电机

表 1 华中电网内区域主导低频振荡模式

Tab. 1 Key oscillation mode in Central China power grid

实部	虚部	频率/Hz	阻尼比	机电相关比
-0.183	3.564	0.567	0.051 36	1.722

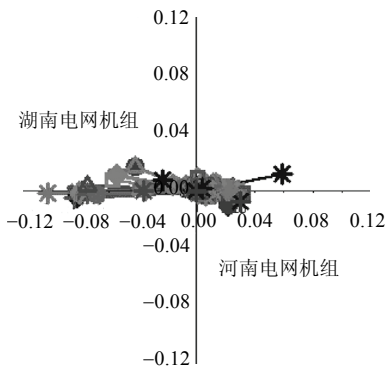


图 6 区域主导振荡模式的模态图

Fig. 6 Mode diagram of key oscillation mode

组的参与因子也较大。

#### 2.3 暂态稳定时域仿真分析

根据华中网调覆冰跳闸事件记录：1 月 21 日 03:31 金竹山 1 号机并网过程中金民 I 回线三相跳闸，金 5012 开关 C 相爆炸(事故前为热备用状态)，则 WAMS 低频振荡记录与覆冰跳闸记录具有时间一致性，故金民 I 回线故障跳闸极有可能引发该区域低频振荡。施加覆冰跳闸记录对应的金民 I 线故障扰动，进行暂态稳定时域仿真计算。

华中电网 500 kV 发电机功角摇摆曲线及有功功率振荡曲线如图 7~8 所示，湘—鄂—豫低频振荡传输通道仿真结果如图 9 所示。

仿真结果表明，振荡趋势及振荡幅值与 WAMS 实测结果基本吻合。湖南电网五岗线、五民线振荡幅

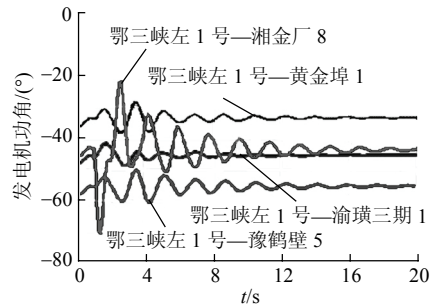


图 7 华中电网 500 kV 发电机组功角摇摆曲线  
Fig. 7 Curves of power angle swing of 500 kV generators of Central China power grid

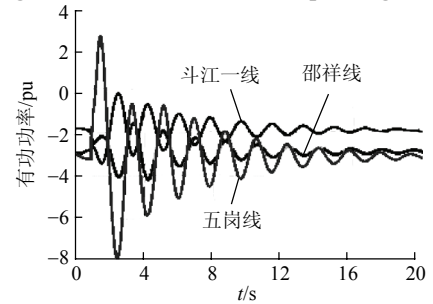


图 8 华中电网 500 kV 输电线路有功功率振荡曲线  
Fig. 8 Curves of active power on 500 kV lines of Central China power grid

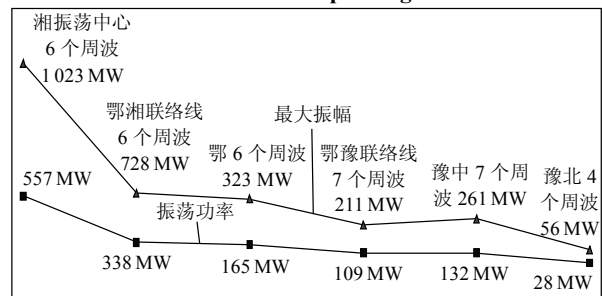


图 9 湘—鄂—豫 500 kV 电网振荡传输通道仿真示意图  
Fig. 9 Illustration of oscillation transmission channel simulated from Hunan to Hubei to Henan 500kV grid

度最大,为全网振荡中心,振荡主要沿着湖南—湖北—河南通道传播,由于系统阻尼作用,振荡逐渐衰减。金民 I 线故障跳闸是引发此次区域低频振荡的直接原因。对 500 kV 线路有功功率时域仿真曲线进行 Prony 分析拟合,得到主导振荡频率为 0.564 Hz、阻尼比为 0.062,与小干扰稳定计算结果基本吻合。但仿真得到的系统振荡频率比 WAMS 实测振荡频率大,阻尼比 WAMS 实测的系统阻尼小,故仿真结果比 WAMS 实测结果多振荡了一个周波,且湖南电网的振荡幅值比实测结果大。

### 3 WAMS 实测低频振荡的仿真逼近

#### 3.1 概述

本节以最新调整的发电机组励磁及 PSS 动态参数为基准,对 WAMS 实测低频振荡进行仿真逼近。新励磁系统模型参数具有以下几个显著特点:

1)所有接入 500 kV 及 220 kV 系统的大容量主力机组基本采用了单机实测励磁参数。

2)接入 500 kV 系统的发电机组,原有的它励常规或快速励磁系统及可控硅调节器励磁系统(1 型)调整为自并励励磁系统电压源可控整流器励磁系统(12 型),励磁模型更加精细。

3)接入 220 kV 系统的大型发电机组,大部分 1 型励磁系统调整为由副励磁机向调节器供电的不可控整流交流励磁机励磁系统(3 型、4 型、7 型、8 型)及 12 型模型。

4)原有自定义励磁系统模型均采用 12 型模型。

5)原有的 12 型励磁系统,其串联校正环节直流增益、时间常数及调节器的励磁顶值电压进行了精细化调整,使之与实际更加接近。

新数据采用的 PSS 模型参数具有如下特点:所有接入 500 kV 及 220 kV 系统的大容量主力机组均采用单机实测 PSS 参数;原有的自定义 PSS 模型部分采用 4 型 PSS 模型,部分 1 型 PSS 调整为 2 型或 3 型、4 型 PSS 模型;原有的 2 型 PSS 模型偏差放大系数、移相环节时间常数根据实测结果进行了调整。

#### 3.2 发电机组励磁系统模型参数调整后系统低频振荡特性分析

考虑到该湖南—河南区域振荡模式的振荡中心在湖南电网,振荡主要在 500 kV 电网传播,且湖南 220 kV 电网大部分发电机组的参与因子也较大,同时振荡又主要是在湖南电网与河南电网(220 kV 及以下发电机组也参与振荡)之间,故上述发电机组励磁系统模型及参数可能是此次区域低频振荡的敏感

性因素。基于上述思路,对发电机组励磁系统模型及参数做出如下调整,对 WAMS 实测低频振荡进行仿真逼近。仿真结果如表 2 所示。

表 2 发电机组励磁系统模型及参数调整前后仿真结果  
Tab. 2 The simulation result before and after adjustment of excitation system models and their parameters

发电机组励磁系统模型及参数	小干扰稳定仿真结果		Prony 分析结果	
	振荡频率/Hz	阻尼比	振荡频率/Hz	阻尼比
励磁未调整	0.567	0.051	0.564	0.062
励磁调整 1	0.559	0.111	0.551	0.122
励磁调整 2	0.517	0.131	0.503	0.133
励磁调整 3	0.513	0.135	0.499	0.133

调整 1:调整华中电网湘、豫、鄂、赣、渝 500 kV 发电机组励磁系统模型及参数。

调整 2:调整华中电网湘、豫、鄂、赣、渝 500 kV 发电机组和湖南电网 220 kV 及以下所有发电机组励磁系统模型及参数。

调整 3:调整华中电网湘、豫、鄂、赣、渝 500 kV 发电机组和湖南电网 220 kV 及以下所有发电机组,河南电网 220 kV 及以下所有 200 MW 以上发电机组励磁系统模型及参数。

可以看出,华中全网 500 kV 发电机组和湖南电网 220 kV 及以下发电机组励磁模型及参数对系统的振荡频率和阻尼比影响较大;由于采用了详细的励磁系统模型,并采取了单机实测参数,新励磁调节器的响应特性优于经典参数;此外由于自并励系统滞后效应小,相频特性平缓,增加了安装 PSS 发电机组的相位补偿适应性,有效改善了系统的阻尼特性。发电机组励磁模型及参数调整为更加准确的实测数据后,仿真结果更符合 WAMS 实测记录。

#### 3.3 发电机组 PSS 模型及参数调整后系统低频振荡特性分析

按照文献[4]规定,结合实测运行方式下的开机综合考虑 PSS 的投运。在上述发电机组励磁系统模型及参数调整(励磁调整 3)的基础上,基于前述参数调整思路,进一步考虑增加投运发电机组 PSS 并调整相关 PSS 模型参数为实测数据对系统低频振荡特性的影响。仿真结果如表 3 所示。

表 3 发电机组 PSS 模型及参数调整前后仿真结果  
Tab. 3 The simulation result before and after adjustment of PSSs models and their parameters

PSS 模型及参数	小干扰仿真结果		Prony 分析结果	
	振荡频率/Hz	阻尼比	振荡频率/Hz	阻尼比
PSS 未调整	0.513	0.135	0.499	0.133
PSS 调整 1	0.495	0.159	0.498	0.126
PSS 调整 2	0.484	0.156	0.498	0.129
PSS 调整 3	0.485	0.154	0.499	0.128
PSS 调整 4	0.485	0.154	0.499	0.128

调整 1: 调整华中湘、豫、鄂、赣、渝电网 500kV 发电机组 PSS 模型及参数。

调整 2: 调整华中湘、豫、鄂、赣、渝电网 500kV 发电机组, 湖南电网 220 kV 及以下发电机组 PSS 模型及参数。

调整 3: 调整华中湘、豫、鄂、赣、渝电网 500kV 发电机组, 湖南电网 220kV 及以下和河南电网 220kV 及以下发电机组 PSS 模型及参数。

调整 4: 调整华中湘、豫、鄂、赣、渝电网 500kV 发电机组, 湖南电网 220 kV 及以下发电机组和河南电网 220 kV 及以下发电机组和鄂赣渝电网 220 kV 及以下发电机组 PSS 模型及参数。

可以看出, 由于该区域振荡模式的强相关机组为 500 kV 湘潭 3 号机、金竹山 8 号机等, 故调整 500 kV 发电机组 PSS 模型及参数对湖南—河南区域主导振荡模式的振荡频率及阻尼比变化较为明显; 而增加投运非强相关的 200 kV 及以下发电机组 PSS 并调整其模型参数对计算结果影响较小, 也在一定程度上验证了只在强相关机组加装 PSS 才能对系统阻尼起改善作用。

对 WAMS 实测低频振荡进行仿真逼近前后, 系统低频振荡特性实测及模拟结果对比如表 4 所示。仿真逼近得到的振荡主传输通道湘—鄂—豫的振荡周波、最大振幅及振荡功率如图 10 所示。(葛岗线振荡功率与 WAMS 实测记录的差异是由于 EMS 和 WAMS 记录数据时间不同步造成)。

表 4 WAMS 实测低频振荡记录与仿真结果对比  
Tab. 4 Comparison of the low frequency oscillation between measured by WAMS and simulated result

主导振荡模式(Prony 分析结果)	振荡频率/Hz	阻尼比
WAMS 实测结果	0.410	0.101
励磁及 PSS 参数调整前	0.564	0.062
仅励磁参数调整后	0.499	0.133
励磁及 PSS 参数调整后	0.499	0.128

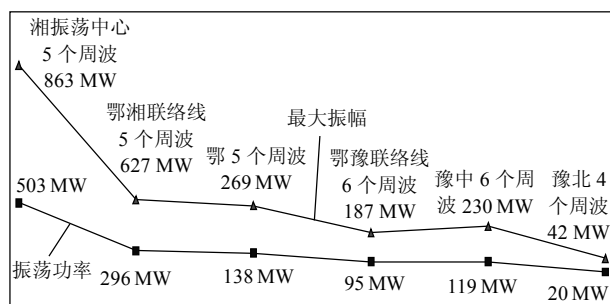


图 10 湘—鄂—豫 500kV 电网振荡传输通道仿真逼近示意图

Fig. 10 Illustration of oscillation transmission channel simulating occurred from Hunan to Hubei to Henan 500 kV power grid

可以看出, 发电机组励磁系统及 PSS 模型参数调整为更为准确的实测数据后, 基本复现了 2008 年 1 月 21 日 03:31 WAMS 实测的区域低频振荡。

## 4 区域低频振荡的抑制措施分析

### 4.1 强相关机组安装 PSS 对低频振荡特性的影响

该区域低频振荡模式的最强相关机组为湖南电网湘潭 3 号机, 考虑到其他几个较强相关机组均已安装了 PSS 并采取了实测参数, 故本节仅考虑在尚未安装 PSS 且为最强相关机组的湘潭 3 号机加装 PSS, 分析其对湖南—河南电网区域振荡模式的影响。

小干扰稳定计算结果表明, 湘潭 3 号机加装 PSS 后, 湖南—河南电网区域振荡模式的振荡频率为 0.415 Hz, 阻尼比为 0.237, 与湘潭 3 号机未加装 PSS 相比, 系统阻尼显著增强(增加 0.083), 可以有效抑制系统的区域低频振荡。

### 4.2 改变运行方式对低频振荡特性的影响

在 2008 年 1 月 21 日 03:30 实测运行方式下, 不改变系统开机方式、负荷水平和发电机组励磁系统及 PSS 模型参数, 仅调整系统运行方式如下: 调整 1 为增加投运 500 kV 岗艾线; 调整 2 为增加投运 500 kV 江复 I 线。小干扰稳定计算结果如表 5 所示。

表 5 运行方式改变前后低频振荡仿真结果

Tab. 5 The simulation result before and after adjustment of grid operation mode

运行方式	小干扰仿真结果		Prony 分析结果	
	振荡频率/Hz	阻尼比	振荡频率/Hz	阻尼比
原实测方式	0.567	0.051	0.564	0.062
调整 1	0.539	0.169	0.553	0.140
调整 2	0.501	0.159	0.512	0.133

上述仿真结果表明, 通过改变系统运行方式, 投运因冰灾停运的输电线路, 系统阻尼得以增强。冰灾期间造成多条输电线路跳闸, 条件许可时应尽快恢复相关线路的投运, 通过加强电网间的电气联系来增强系统阻尼, 可在一定程度上抑制系统低频振荡。

综上所述可以看出, 在强相关机组安装 PSS 可以显著增强系统阻尼, 有效抑制低频振荡。根据华中电网的运行实际和发展规划, 建议在适宜电厂加装 PSS, 增强系统阻尼, 更好地抑制低频振荡。

## 5 结论

1) 2008 年 1 月 21 日 03:31 WAMS 实测到的振荡频率 0.41 Hz、阻尼比 0.101 左右的湖南—河南之间的区域振荡, 金民 I 线故障扰动是引发此次低频振荡的主要原因; 振荡主要沿着湖南电网—湖北电

网—河南电网的路径传播,基本覆盖了湖南、湖北及河南3省电网,振荡中心位于湖南电网的岗市—五强溪—民丰地区,最大振荡功率达500MW。

2) 湖南电网多条500kV线路跳闸使系统电气联系减弱,但大量线路跳闸的同时损失了大量负荷,电网总体上轻载运行,不存在“弱联系重负荷”的电力传输格局,仿真结果表明系统中无弱阻尼区域振荡模式。华中电网内湖南—河南区域振荡模式的阻尼较强,故金民I线故障跳闸引发的区域低频振荡呈较快衰减的动态稳定特性。

3) 发电机组励磁系统及PSS参数实测工作非常重要,采用实测的励磁及PSS参数能更准确地反映系统的实际动态特性。

4) 基于WAMS实际测量记录,校核仿真系统模型使之与实际系统特性相一致,是一个亟需解决的课题,本文的研究对此进行了有益的尝试,对于该问题的深入研究、解决具有一定的价值。

## 参考文献

- [1] 华中电网有限公司. 2008年冰灾期间华中电网WAMS系统实测低频振荡事件仿真复现研究报告[R]. 武汉: 华中电网有限公司, 2008.
- [2] DL755-2001, 电力系统安全稳定导则[S].
- [3] 国家电网调[2006]161号. 国家电网公司电力系统安全稳定计算规定[Z]. 北京: 国家电网公司, 2006.
- [4] 华中电网有限公司. 华中主网2007年冬季稳定规定[Z]. 武汉: 华中电网有限公司, 2007.
- [5] 李丹, 苏为民, 张晶, 等. “9.1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 41-47.  
Li Dan, Su Weimin, Zhang Jing, et al. Simulation study on west inner Mongolia power grid oscillations occurred on September 1st, 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 41-47(in Chinese).
- [6] 樊爱军, 雷宪章, 刘红超, 等. 研究大规模互联电网区域间振荡的特征值分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 35-39.  
Fan Aijun, Lei Xianzhang, Liu Hongchao, et al. Eigenvalue analysis methods for inter-area oscillations in large-scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 35-39(in Chinese).
- [7] 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 Dongxia, 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(in Chinese).
- [8] 余保东, 孙建波, 汤胜祥, 等. 湖北电网低频振荡计算分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 39-42.  
Yu Baodong, Sun Jianbo, Tang Shengxiang, et al. Calculation and analysis of low-frequency oscillations in Hubei grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 39-42(in Chinese).
- [9] 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(in Chinese).
- [10] 潘炜, 刘文颖, 李杨楠, 等. 采用实测励磁系统参数提高西北电网输电能力的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 34-39.  
Pan Wei, Liu Wenying, Li Yangnan, et al. Research on improving transmission capability of Northwest China power grid by use of actually measured parameters of excitation system[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 34-39(in Chinese).
- [11] 王刚, 陶家琪, 徐兴伟, 等. 东北电网500kV人工三相接地短路试验总结[J]. 电网技术, 2007, 32(4): 42-48.  
Wang Gang, Tao Jiaqi, Xu Xingwei, et al. 500 kV man-made three-phase earthing short circuit experiment in northeast power grid[J]. Power System Technology, 2007, 32(4): 42-48(in Chinese).
- [12] 赵红光, 刘增煌, 朱方. 华中—川渝联网稳定计算用发电机励磁和调速系统的数学模型及参数[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 50-57.  
Zhao Hongguang, Liu Zenghuang, Zhu Fang. Research on mathematical models and parameters of generator excitation system and governor system for stability analysis of interconnection of central China power grid with Sichuan-Chongqing power grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 50-57(in Chinese).
- [13] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 22-27.  
Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Hu Zhixiang, et al. Power system wide-area damping control based on online system identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 22-27(in Chinese).
- [14] 毛小明, 张尧, 管霖, 等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 55-59.  
Mao Xiaoming, Zhang Yao, Guan Lin, et al. Research on coordinated control strategy for inter-area oscillations in China Southern AC/DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 55-59(in Chinese).
- [15] 肖晋宇, 谢小荣, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区域间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.  
Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Tong Luyuan, et al. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 37-40(in Chinese).



董明齐

收稿日期: 2008-11-10。

作者简介:

董明齐(1982—), 男, 工程师, 从事电网分析计算、规划工作, E-mail: dmqhw2004@163.com;

杨东俊(1975—), 男, 高级工程师, 从事电网规划、开发工作;

黄涌(1962—), 男, 高级工程师, 从事电网规划工作;

周宏(1961—), 男, 教授级高级工程师, 从事电网规划和管理工作的。

(责任编辑 王晔)