

基于 RTDS 和 PSASP 的华中电网低频振荡研究

党杰, 刘涤尘, 潘晓杰, 邹江峰, 雷庆生, 王静

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 结合华中电网实际情况, 利用电力系统分析综合程序 (PSASP) 进行小干扰稳定计算, 找出对系统安全威胁较大的特征值并对其进行分析, 并进行了线路加装串联补偿装置仿真, 仿真结果表明: 串联补偿对区域间振荡模式有抑制作用, 可以提供良好的阻尼, 但对区域内振荡的阻尼作用并不显著。通过实时数字仿真器 (RTDS) 对华中电网合理有效建模, 并利用其研究扰动对电网稳定性的影响及加装 PSS 和串联补偿装置对扰动后系统低频振荡的影响, 得出的结论与 PSASP 一致, 为今后研究低频振荡问题提供了一种新的行之有效的方法。

关键词: 电力系统; 阻尼; 低频振荡; 特征值分析; 实时数字仿真器 (RTDS)

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)13-0033-05

0 引言

大区电网互联是目前我国电网发展的趋势, 在此过程中将伴随一些亟待解决的联网技术问题: 如大区电网通过弱联络线交流互联时, 区域电网间可能存在的低频振荡问题。国内外电网互联的发展过程中都曾有过这样的例子^[1,2]。有资料表明: 在特定的情况下, 小干扰稳定性较弱所引起的低频振荡问题甚至成为限制电网发电能力、阻碍大型机组按设计满负荷并网发电的关键^[3], 同时严重威胁电网的安全稳定运行。

三峡电站投运、川渝电网并入华中电网后, 四川二滩电厂的电力通过远距离的交流线路送入华中电网, 发电机组之间的电气联系较弱。近几年来, 华中鄂西电网曾多次发生低频振荡现象。2005 年 10 月 29 日 22:22 至 22:25, 华中电网 500、220 kV 线路再次发生不同程度振荡^[4], 系统频率在 49.91 ~ 50.01 Hz 之间摆动, 500 kV 线路普遍有振荡。

针对这种威胁电网安全稳定运行的状况, 本文结合华中电网网架结构、传输特点, 应用《电力系统分析综合程序》进行小干扰稳定计算; 同时利用一种新的分析低频振荡问题的方法——实时数字仿真器 (RTDS) 来分析低频振荡问题。在对系统进行建模并验证该等值模型的合理有效性基础上, 分析电力系统稳定器 (PSS) 和串联补偿装置对扰动后系统低频振荡的影响, 得到了较为满意的结果。

1 华中电网低频振荡的计算与分析

1.1 计算条件

计算程序采用 PSASP(6.2)。本次计算以 2005 年丰大数据为依据, 共有发电机 346 台, 川渝电网发电机模型全部计及了励磁系统和调速系统, 同步机采用五阶模型; 华中电网的发电机模型也均计及励磁系统和调速系统, 同步机分为两种模型, 100 MW 以上机组采用五阶模型, 100 MW 以下机组采用三阶或两阶模型; 共有负荷 666 个, 均采用恒定阻抗与感应电动机相结合的模型, 感应电动机采用三阶模型。计算中考虑了华中电网内的直流输电线路。

1.2 计算结果及分析

本次计算中, 通过改变华中电网的运行状态, 例如不断加重华中电网渝鄂输电断面 (三万联络线) 的输送功率, 得到了许多频率在 0.1 ~ 2.5 Hz 之间的振荡模式, 其中有 8 对主导特征模式, 具体结果如表 1 所示:

表 1 华中电网主导特征值简表

Tab 1 Dominant eigenvalue in Central China Grid

序号	实部	虚部	频率 / Hz	衰减阻 尼比 / (%)	机电回路 相关比
1	0.078	6.596	1.049	-1.187	7.581
2	-0.057	4.048	0.644	1.413	1.719
3	-0.088	7.672	1.221	1.146	25.804
4	-0.090	13.938	2.218	0.642	99.509
5	0.216	3.804	0.605	-5.657	1.258
6	0.259	4.341	0.691	-5.976	1.778
7	-0.178	14.875	2.368	1.194	38.851
8	-0.019	7.987	1.271	0.243	170.347

从表 1 可以看出, 在目前华中电网众多机组加装 PSS 的情况下, 电网还是存在不稳定运行点。随

着四川水电机组送华中东部电网功率的增加,当鄂渝断面输送功率超过 1 500 MW 时,电网开始出现不同方式的振荡。下面仅就其中三个有代表性的特征值进行分析。

特征值 1 对应的是区域内负阻尼增幅振荡模式,振荡频率为 1.049 Hz,系统中主要是四川和重庆发电机参与振荡。特征值 1 对应的模态图如图 1 所示,由图 1 可看出映秀湾机组和川渝其它机组之间相位相差约为 180°,该模态表征映秀湾机组相对川渝其它机群发生了相位相反的对振荡。可以认为映秀湾机组相对川渝其它机群的相对振荡是引起该模式下局部振荡的重要原因。

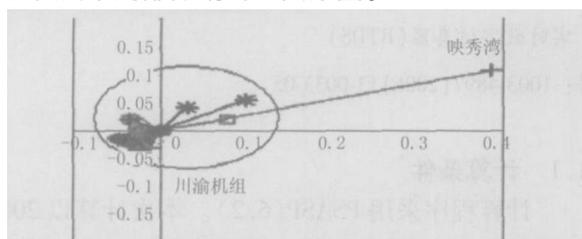


图 1 特征值 1 的模态图

Fig 1 Mode shape of eigenvalue I

特征值 2 对应的是区域间弱阻尼振荡模式,振荡频率为 0.644 Hz。系统中所有的江西发电机和部分的湖南发电机参与了振荡,江西机群和湖南机群相位相差约为 180°,其中特征向量振幅最大发生在万安电厂 40 MW (4 ×10 MW)和五站电厂 120 MW (5 ×24MW),其模态图如图 2 所示。结合模态图观察,该模态表征江西机群和湖南机群之间发生了相位相反的对振荡。

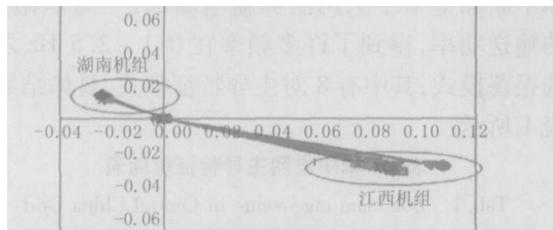


图 2 特征值 2 的模态图

Fig 2 Mode shape of eigenvalue II

特征值 6 对应的是区域间负阻尼增幅振荡模式,振荡频率为 0.691 Hz。系统中的所有发电机都参与了振荡,该振荡模式对四川水电机群、湖南水电机群和湖北三峡电电厂、隔河岩电电厂影响最大,其中特征向量振幅最大值发生在三峡电厂 840MW (14 ×60 MW)和东江电厂 50 MW (4 ×12.5 MW),其模态图如图 3 所示,结合模态图观察,该模式表征湖北水电机群和四川、湖南水电机群之间发生了相

位的相对振荡是引起该模式下全局增幅振荡的主要原因。

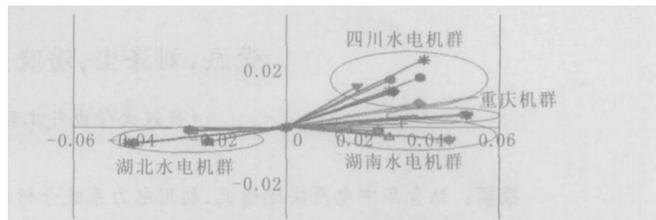


图 3 特征值 6 的模态图

Fig 3 Mode shape of eigenvalue VI

从 8 对特征值对应的相关因子可知两个负阻尼的区域间振荡模式都主要和川渝电网相关,一个负阻尼的区域间振荡模式发生在川渝电网内,可以说川渝电网内部本身存在负阻尼振荡。

在实际电力系统中,对系统安全威胁较大的低频振荡是那些频率在 0.1 ~ 1.0 的特征值。本次计算中的特征值 5 和特征值 6 就是这类特征值。为抑制华中电网的区域间增幅振荡,在万县 3/三峡 3/龙泉 500 kV 输电线路上加装串联补偿装置 (FSC),以分析加装串联补偿器对提高华中电网稳定性的影响。加装串联补偿器后的华中电网主要特征值对比如表 2 所示:

表 2 “三万 500kV 加串补后主要特征值对比表

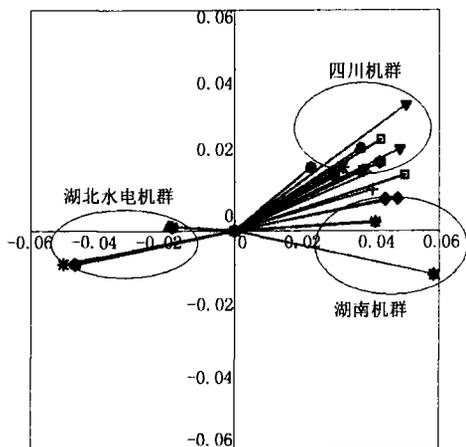
Tab 2 Comparison of eigenvalues with/without FSC in Sanwan 500 kV line

序号	实部	虚部	频率 /Hz	衰减阻 尼比 / (%)	机电回路 相关比
1	0.078	6.596	1.049	-1.187	7.581
1'	-0.459	6.994	1.113	6.559	6.848
2	-0.057	4.048	0.644	1.413	1.719
2'	-0.064	4.106	0.653	1.548	1.548
6	0.259	4.341	0.691	-5.976	1.778
6'	-0.297	4.522	0.719	6.562	1.741

注: 1、2、6 为加装串补前特征值, 1'、2'、6' 为加装串补后特征值。

从表 2 可以看出,特征值 1、2、6 分别对应三种不同的振荡模式。特征值 1 对应区域内负阻尼增幅振荡模式,特征值 2 对应区域间弱阻尼振荡模式,特征值 6 对应区域间负阻尼增幅振荡模式。在华中电网三万 500 kV 输电线路上加装串补后,有效的消除了特征值中对应的负阻尼振荡模态,特征值 1 和特征值 6 的阻尼系数由负变为正,而特征值 2 的阻尼系数没有明显的改善。

通过观察图 4 的模态图可知,重庆机组在加装串补后稳定特性得到提高,重庆机群没有一台机组参与区域间弱阻尼振荡。

图4 加串补后特征值 λ_1 的模式图Fig 4 Mode shape of eigenvalue λ_1 with FSC installed

2 应用 RTDS对华中电网进行仿真研究

实时数字仿真器 RTDS是全数字化的电力系统电磁暂态 (EMTP)模拟装置。其重要特性是能维持实时条件下的连续运行,换言之,它能足够快地求解电力系统的方程并连续地产生输出,这些输出真实地代表了实际网络的状态。目前,RTDS已经在很多方面有了实际应用:线路保护装置的动模试验^[5]、输电线路行波故障定位装置的测试^[6]、变电站设备的选择^[7]等,但利用 RTDS分析低频振荡问题还未见到实际应用。

利用 RTDS进行系统建模时,必须考虑输电线路分布参数特性和参数的频率特性、发电机的电磁和机电暂态过程以及相关元件的非线性特性。由于网络方程非常复杂,而硬件资源有限制,计算可能出现数值溢出问题,在进行 RTDS仿真之前,必须对华中电网进行等值化简。如图 5 为 3机 1电源系统单线图。

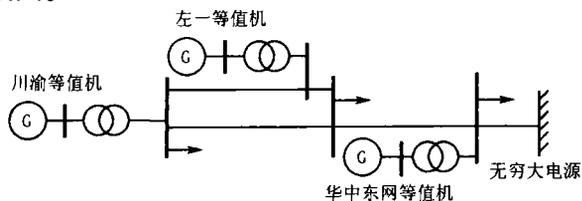


图5 3机 1电源系统单线图

Fig 5 System equivalent model with three generators and one power supply

2.1 建模情况介绍

发电机模型全部选取 E_q 变化模型,所有机组均计及调压器和调速器的影响。调速器与励磁调节

采用 IEEE标准模型, PSS采用 IEEE 2ST模型,线路采用 Bergon物理参数模型,负荷模型采用 40%恒阻抗模型和 60%的感应电动机模型。

计算仿真的运行方式仍为华中电网 2005年丰大运行方式。三台发电机分别采用川渝等值机,左一等值机以及华中东网等值机的简化参数,无穷大电源相当于平衡节点调节系统潮流。初始条件为:川渝等值机出力为 2 070 MW,左一等值机出力为 4 500 MW,华中东网等值机等效为电动机模式,川渝等值机与左一机均装设 PSS。另外,万县侧、龙泉侧和荆门侧采用等效负荷。将川渝与华中的联络线,即:万县³三峡左一(简称三万线,320 km),万县³龙泉(万龙线,366 km)两回线路保留;并保留三峡左一³龙泉(三龙线 58 km)三回线和龙泉³荆门(龙荆线 80 km)线路,以及联接无穷大电源的龙泉³孝感(200 km单回)线路。

扰动选取负荷变动和三相瞬间短路,接地故障在 0.09 s后故障切除,1.0 s后自动重合闸。

对系统进行稳态模拟以及扰动后低频振荡情况分析,观察联络线上的低频功率振荡情况;对电力系统稳定器 (PSS)及串联补偿装置抑制低频振荡的效果进行分析。

2.2 建模结果及分析

2.2.1 PSS抑制低频振荡的分析

分析 2005年丰大运行方式,川渝电网向华中东网送电 1 500 MW时,是否装设 PSS对于系统发生扰动后振荡情况的影响,振荡情况如图 6所示。

分析图 6(a)~(d)可知,加装 PSS对抑制传输线在小扰动后的振荡效果显著,30 s后幅值从 130 MW减小到 3 MW,振荡平息时间从 53 s减小到 16 s。对大扰动后的振荡,30 s后幅值从 200 MW减小到 3 MW;在振荡平息时间上,未加装 PSS需要 116 s,加装后功率振荡在不到 16 s时已基本消失。

2.2.2 串联补偿抑制低频振荡的分析

川渝向华中东网送电 1 500 MW,川渝等值机和左一机装设 PSS,并在三万线以及万龙线线路中间装设串补度为 30%的常规串联补偿器下进行仿真,当三万线发生单相瞬间接地故障后,分析装设常规串联补偿器对系统低频振荡的影响,波形如图 7所示。

由结果可知,当系统发生单相瞬间接地故障时,与未装常规串补相比,线路上加装常规串补时低频振荡衰减显著。

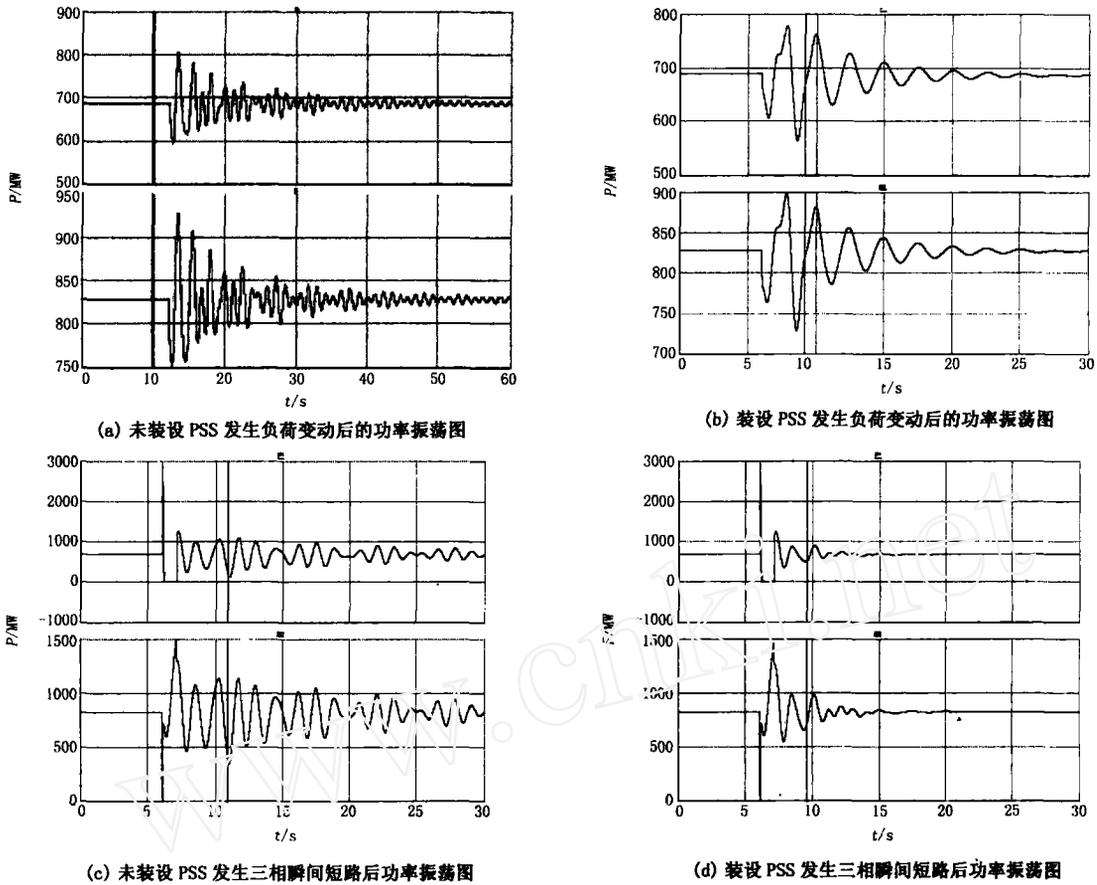


图 6 装设与未装设 PSS 时的功率振荡图

Fig 6 Comparison of active power curves with/wwithout PSS

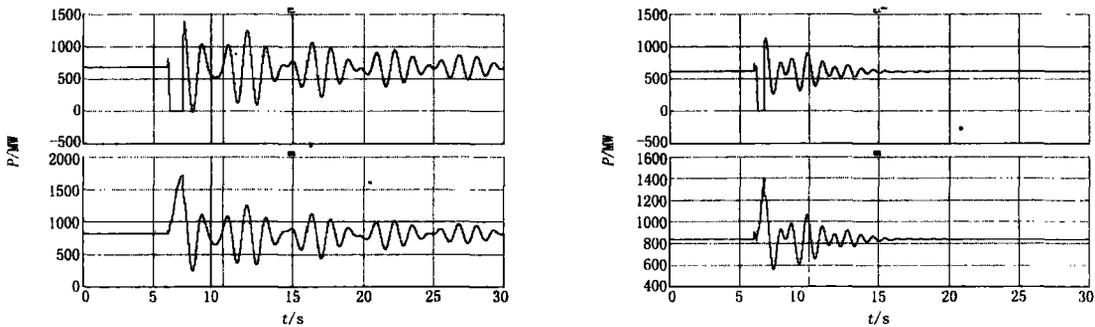


图 7 装设与未装设串补时发生单相瞬间接地故障后线路功率振荡图

Fig 7 Comparison of active power curves after single-phase transient grounding with/wwithout FSC

3 结论

本文结合华中电网实际情况,应用 PSASP 进行小干扰稳定计算;利用 RTDS 对华中电网进行合理有效建模,并利用其研究扰动对电网稳定性的影响及加装 PSS 和串联补偿装置对扰动后系统低频振荡

的影响,得到以下结论:

(1) 华中³川渝互联系统间既存在川渝和华中之间的区域间振荡模式,又在两网内部存在区域内振荡模式,如川渝网内部二滩电厂相对于四川主网的振荡以及华中网内部三峡相对于华中主网的振荡。串联补偿对区域间振荡模式可以提供良好的阻尼,

对其有抑制作用,但对区域内振荡的阻尼作用并不显著。

(2) 说明了利用 RTDS建立合理有效的电力系统等值模型及研究扰动对电网稳定性影响的可行性和有效性。利用 RTDS分析川渝与华中东网联络线可能发生的低频振荡,研究了川渝等值机和左一等值机装设 PSS以及在川渝与华中东网联络线上装设常规串补对扰动后系统低频振荡的影响。结果表明:装设 PSS和常规串补均可以使受扰动后系统低频振荡的幅值更快衰减,使振荡平息时间明显缩短。

本文应用 RTDS分析低频振荡问题,为研究低频振荡提供了一种新的行之有效的方法。

参考文献:

- [1] Brochu J, Beaugard F, Lemay J, et al Application of the Interphase Power Controller Technology for Transmission Line Power Flow Control[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(2).
- [2] 中国电力科学研究院. 全国大区电网互联格局和联网规模研究[R]. 2001.
China Electric Power Research Institute. The Research on Pattern of Grid Interconnection and Interconnection Scale in Bulk Power Grids[R]. 2001.
- [3] 孙衢, 徐光虎, 陈陈. 负荷模型动态特性不确定性对低频振荡的影响[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 11-14.
SUN Qu, XU Guang-hu, CHEN Chen Effects of Uncertainties in Composite Load Models on Low-frequency Oscillation in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 11-14.

- [4] 华中网调运行方式处报告. 华中电网 2005年 10月 29日系统振荡情况汇报[R]. 2005.
The Report of Central China Grid The System Oscillation Report in Central China Grid[R]. 2005.
- [5] 李保福, 李莹, 王芝茗, 等. RTDS应用于线路保护装置的动模试验[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 69-70.
LI Bao-fu, LI Ying, WANG Zhiming, et al Comprehensive Test of Protective Relays on Different Ends of Long Transmission Line by RTDS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(15): 69-70.
- [6] 许汉平, 魏威, 邹建明, 等. 利用 RTDS测试输电线路行波故障定位装置[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 45-47.
XU Han-ping, WEI Wei, ZOU Jian-ming, et al Use of RTDS to Test Traveling Wave Based Fault Location Devices for Transmission Lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(24): 45-47.
- [7] 刘南平. 侯寨变电站补偿电容器的串联电抗器的仿真选择[J]. 广西电力技术, 2000, (1): 11-14.
LU Nan-ping Simulative Choice of Serial Reactor for Compensating Capacitor in Houzhai Substation [J]. Guangxi Electrical Technology, 2000, (1): 11-14.

收稿日期: 2005-12-07; 修回日期: 2005-12-30

作者简介:

党杰(1981-),女,博士研究生,主要从事电力系统稳定性方面的研究;E-mail: dangchunqiu@163.com

刘涤尘(1953-),男,教授,博导,长期从事电力系统及其自动化方面的教学和研究工作。

Study of low frequency oscillation for Central China Grid based on RTDS and PSASP

DANG Jie, LU Di-chen, PAN Xiao-jie, ZOU Jiang-feng, LEIQ ing-sheng, WANG Jing
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, the analysis and calculating for low frequency oscillation is presented based on the framework and transmit characteristics of the Central China Grid. First, small signal stability is analyzed by Power System Analysis Software Package (PSASP). The simulation results show that the series compensation is very helpful to inter-area oscillation, but there is not an obvious change to local-area oscillation. Second, a novel method—Real-time Digital Simulator (RTDS) to analyze low frequency oscillation is given. Based on system modeling, the effects of PSS and series compensation device to power system after disturbance are analyzed. The simulation results show that the decay of amplitude is fast and the time of calming down is shorter obviously when PSS or series compensation device is installed. It has the accordant results with PSASP on low frequency oscillation. Therefore, RTDS is a new effective way to analyze low frequency oscillation.

Key words: power system; damping; low frequency oscillation; eigenvalue analysis; real-time digital simulator