

特高压交直流混联条件下四川电网 低频振荡模态分析

张航, 王晓茹

(西南交通大学电气工程学院, 四川成都 610031)

摘要:以2017年“三华”电网模型为基础,研究了含特高压输电线路的四川电网内部的低频振荡模式。对目前已有低频振荡机理进行了总结。通过对不同典型运行方式的分析,指出了含特高压输电线路的四川电网存在的几种振荡模式,并论证了电力系统稳定器(PSS)对抑制该振荡频率的重要性;开展了时域、频域的对比分析及验证,提出时域仿真分析中进行参数辨识的典型经验。最后,对下一步开展低频振荡研究工作的重点和方向进行了展望。

关键词:特高压; 低频振荡; 强迫振荡; 电力系统稳定器

Abstract: Taking the project interconnecting North China Power Grid with Central China Power Grid and East China Grid as the research background, the low-frequency oscillation mode of Sichuan power grid containing UHV transmission lines is studied. With a review and summary of several mechanism of low-frequency oscillation, the main low-frequency oscillation modes in Sichuan power grid with UHV transmission lines are summarized based on the analysis of different typical operation modes, and the importance of power system stabilizer (PSS) to suppress the oscillation frequency is demonstrated. By verifying and analyzing the comparison of both time domain and frequency domain, the typical experiences of parameter identification in the time domain simulation analysis are proposed. Finally, the focus and direction for the future research of low-frequency oscillation are forecasted.

Key words: ultra-high voltage (UHV); low-frequency oscillation; forced oscillation; power system stabilizer

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0019-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.005

0 引言

近年来,随着电力系统规模不断扩大,特高压输电线路的增长以及大容量机组、快速励磁装置的投运,互联电网运行愈接近极限临界点,振荡失稳问题日渐严重,最常见的就是低频振荡。低频振荡是电力系统稳定运行中的重要议题,快速并准确地辨识低频振荡模式对电网的低频振荡分析和控制有着极为重要的意义^[1]。中国西部能源基地距离东部重负荷中心较远,外送电力规模很大,发展直流输电技术是大势所趋。在中国已经形成多直流送出和多直流馈入电网,相应的交直流网架系统正逐步建成,其对混联电网的运行和控制也提出了更高的要求。2015年四川通过特高压输电工程外送清洁水电达到103 841 GWh,减少火电原煤消耗4 000多万吨,减少二氧化碳排放1.5亿吨。可以预见,随着经济社会发展以及技术的提升,未来十年随着西南电网

以及西部电网的建设,四川将迎来特高压输电技术大跨越发展时期,而特高压工程使得四川电网和外网之间的电气联系更加紧密。在此背景下,结合四川电网实际工程研究特高压交直流系统下的小扰动稳定性,具有极其重要的工程价值和现实意义。

基于含特高压输电线路的四川电网仿真模型,开展低频振荡专题研究;分析特高压输电工程投产后四川主要存在的低频振荡模式,并对比基于模型和量测数据的辨识结果,结合当前实际工程问题对低频振荡抑制措施提出了建议。

1 低频振荡机理

目前,低频振荡产生机理主要有3个方面:负阻尼机理、强迫振荡机理和混沌理论。

负阻尼机理是由F. P. Demello于1969年提出来的^[2],该理论认为发电机阻尼转矩不足导致了小扰动功角失稳,原因在于高倍率的励磁放大系统导

致系统阻尼下降,系统对某些固有频率的振荡表现出负阻尼特性,抵消了系统固有的正阻尼,使得系统的总阻尼很小或者为负,这样一旦出现扰动,就会引起转子增幅振荡或者振荡不收敛。当远距离输电线路潮流较重时有可能出现阻尼较低甚至为负的低频振荡,若系统中大量使用快速励磁系统,则系统的阻尼问题更为严重。电力系统受到扰动后会出现低频振荡现象,而当系统阻尼较低时低频振荡衰减较慢,振荡持续时间较长,当系统阻尼为负时振荡幅值不断增大,最终引起系统失稳解列。负阻尼机理是目前发展最为完善的低频振荡机理,已成为解析低频振荡现象和设计电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的主要理论依据。

强迫振荡着重关注于周期性负荷波动或振荡调节的作用。当发电机受到的周期性扰动频率接近系统固有振荡频率时,在该频率下便会引起系统谐振,导致大幅度的功率振荡^[3]。强迫振荡具有当扰动源存在时振荡迅速起振、当扰动源消失时振荡迅速消失和起振后保持等幅同步振荡等特点。文献[4]通过仿真算例分别简要分析了同步力矩系数、阻尼转矩系数、发电机组的惯性时间常数和扰动量幅值对系统共振特性的影响程度,同时归纳出了振荡特性。文献[5]基于能量角度分析了电力系统在发生共振机理低频振荡过程中,内、外能量的变化关系和特征。文献[6]对电力系统中原动机功率和负荷的持续周期性小扰动造成电网强迫功率振荡进行了分析,阐述了这两种扰动源的不同性质。在强迫振荡的研究中,强迫振荡源定位是关键,文献[7-8]分别运用基于能量和波形相似度的方法进行强迫振荡源定位。

混沌理论认为电力系统参数或扰动在一定范围内变化时,由于电力系统非线性的影响使得系统参数间相互作用,导致系统稳定结构发生变化,进而产生振荡,如非周期性、似乎无规则的突发性机电振荡。该理论与成熟的线性系统理论相去甚远,受到数学工具的限制,仍停留在理论探索阶段^[9]。

负阻尼机理、混沌机理都与系统本身的固有结构和参数有关,强迫振荡机理与扰动信号有关。除了以上3种理论,还有其他原因解释低频振荡现象,例如交直流系统间的相互作用、电网链式分布、区域间功率不平衡^[10]等。值得一提的是,电力系统是一个复杂的动态系统,不同机理的低频振荡可能同时

发生;不同模式的振荡彼此之间有时候会相互作用,这时需考虑系统结构和运行方式对低频振荡模式的影响,准确辨识出低频振荡的主导模式。

2 研究对象及研究方法

采用四川电网2017年网架,计算中考虑丰大、枯大这两种典型方式,主要机组的发电机模型多采用考虑阻尼绕组的次暂态模型。当前四川电网接入500 kV电网的主力机组主要采用自并励静止励磁系统,励磁系统均配置了电力系统稳定器(PSS)模块,且通过实测建立了励磁系统及PSS模型。计算采用的负荷模型为纯静态负荷模型。

当前电网低频振荡分析方法主要可分为频域、时域两大类,依据研究对象和目标的不同以及各种方法的不同特点分别用于不同场合。其中,隐式重启动Arnoldi算法属于典型的特征值分析法,在大规模电力系统实际分析中存在一定优势,并已被集成在PSASP程序中,下面将采用该方法开展研究。

3 计算结果及分析

3.1 丰大方式下四川电网主要振荡模式

2017年丰大方式下,采用小扰动稳定分析程序(PSD-SSAP)隐式重启动Arnoldi算法得出四川电网内部共6个机电振荡模式。其对应的特征值如表1所示。

表1 丰大方式下存在的低频振荡模式信息

模式	频率/Hz	阻尼比	相关比
1	0.757	0.013	8.473
2	0.663	0.023	4.880
3	1.044	0.038	10.326
4	0.987	0.045	9.431
5	0.877	0.047	8.311
6	0.330	0.041	2.828

从表1可以看出,模式2、模式6的阻尼比较小,属于弱阻尼模式。下面将分别对这6个振荡模式进行详细分析,分析得出每个振荡模式下参与因子较高的机组,并对阻尼比为负或者阻尼比较小的振荡模式通过对相关机组加装PSS来提高系统阻尼。

1) 康定和溪洛渡之间的振荡

2017年丰大方式,存在特征值为 $-0.064 + j4.759$ 、频率为 0.757 Hz、阻尼比为 0.013 的振荡模式,该模式机电回路相关比为 8.473,主要表现为丹巴、康定机组对溪洛渡机组的振荡,机组模态分布图如图 1 所示。

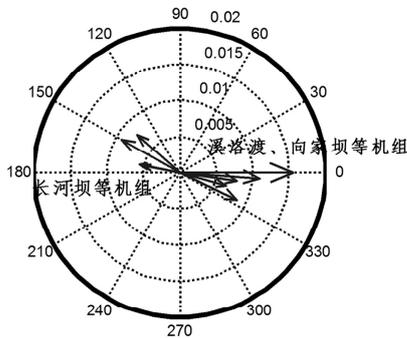


图 1 康定对溪洛渡的振荡模态

通过对溪洛渡左、长河坝机组加装 PSS 后,向家坝左—长河坝间的振荡模式的阻尼比有所增加,振荡频率变为 0.737 7 Hz,阻尼比为 0.070 0,说明溪洛渡机组 PSS 的投入对该振荡模式的抑制效果十分明显。

2) 丹巴对木里模式

该振荡模式频率为 0.663 Hz,阻尼比为 0.023,主要表现为丹巴、康定机组相对乡城、木里机组的振荡,机组模态分布图如图 2 所示。

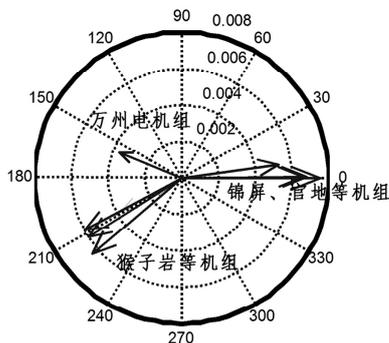


图 2 丹巴对木里的振荡模态

通过对猴子岩、长河坝机组加装 PSS 后,色玉—古瓦间的振荡模式的阻尼比有所增加,振荡频率变为 0.647 1 Hz,阻尼比为 0.038 7。

3) 向家坝机组对乡城机组模式

该振荡模式的频率为 1.044 Hz,阻尼比为 0.038,主要表现为向家坝、新平、方山和乡城地区间的振荡,机组模态分布图如图 3 所示。

4) 锦屏对乡城模式

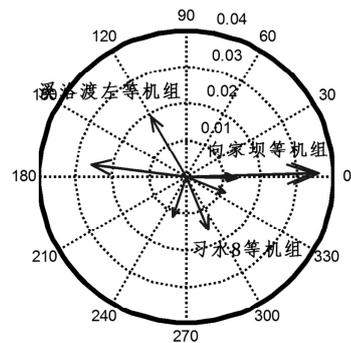


图 3 向家坝对乡城的振荡模态

该振荡模式的频率为 0.987 Hz,阻尼比为 0.045,主要表现为锦屏和乡城、木里间的振荡,机组振荡模态图如图 4 所示。

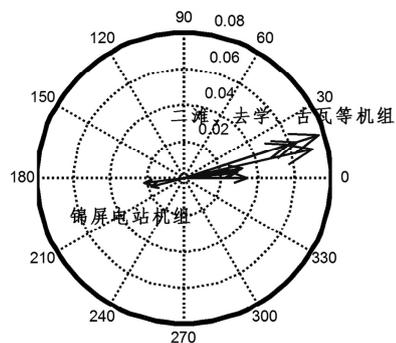


图 4 锦屏对乡城的振荡模态

5) 九石雅机组对康定机组模式

该振荡模式的频率为 0.877 Hz,阻尼比为 0.047,主要表现为九石雅、瀑布沟和丹巴、康定地区间的振荡,机组模态分布图如图 5 所示。

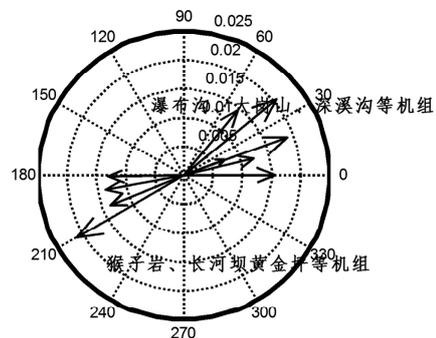


图 5 九石雅对康定的振荡模态

6) 川渝主网对华中、河南模式

该振荡模式的频率为 0.33 Hz,阻尼比为 0.041,主要表现为川渝主网和华中电网间的振荡,机组模态分布图如图 6 所示。

3.2 枯大方式下的振荡模式分析

进一步对四川电网 2017 年枯大方式下的低频振荡特性进行分析,通过 PSASP 软件计算,共得到 3

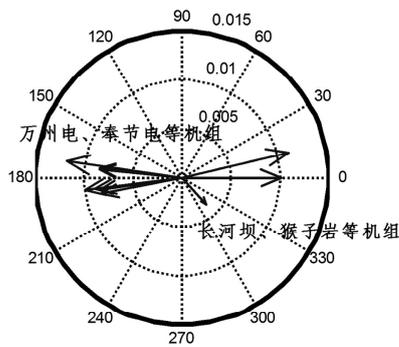


图6 锦屏对乡城的振荡模式

个机电振荡模式,其对应的特征值如表2所示。

表2 枯水方式下存在的低频振荡模式信息

模式	频率/Hz	阻尼比	相关比
1	0.867	0.028	9.742
2	0.786	0.030	8.125
3	0.320	0.042	6.894

结合表2和模态分析结果可知,振荡模式1表现为乡城、木里对溪洛渡、向家坝间的振荡,模式2表现为丹巴、康定对乡城、二滩间的振荡,模式3表现为川渝主网和华中电网之间的振荡。从不同方式下的低频振荡结果可以得出以下结论:两种典型方式下,四川电网主要呈现出乡城、木里对溪洛渡、向家坝,丹巴、康定对乡城、二滩以及川渝主网对华中电网等典型的振荡模式;机组PSS投入情况下,上述振荡模式的阻尼比均超过3%,说明实际运行中机组PSS的投入至关重要。

4 大扰动时域仿真及验证

以四川电网对华中电网的振荡模式为例进行时域仿真验证。经分析,尖山桃乡尖侧故障易引起特高压解列,四川、湖北间可能出现动态失稳现象。图7所示为尖山桃乡桃侧N-1故障后二滩机组和三峡机组间的功角差曲线。

采用滑动窗法^[11]对该功角差曲线进行Prony分析。设单个数据窗时长为5s,相邻数据窗时间间隔为2s,滑动窗区间为5~25s,每个滑动窗内数据均采用两种方法分别辨识振荡模式的频率和阻尼比,可得到9组辨识结果,其统计值如表3所示。

对比时域仿真分析和基于模型的分析结果(表2模式3)可知,两种方法分析结果基本一致。对其

他振荡模式进行对比分析,可得到类似结论,因篇幅所限不再赘述。

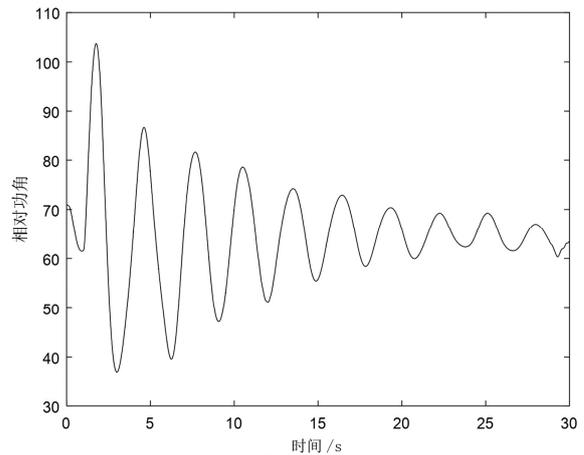


图7 二滩机组和三峡机组间的功角差曲线

表3 基于仿真数据的辨识结果

算法	频率		阻尼比	
	均值/Hz	标准差/Hz	均值/%	标准差/%
Prony	0.3506	0.0076	6.98	2.07

5 结论

1) PSS的投入对抑制低频振荡至关重要,若相关机组PSS退出,各模式阻尼比均大幅下降,甚至出现负阻尼模式,说明实际运行中机组PSS的投入至关重要。

2) 进行了大扰动时域仿真,并与频域分析进行了对比。结合实际工程经验,应用传统分析方法进行了参数的辨识。

3) 因篇幅所限,未对低频振荡的抑制措施展开深入讨论;考虑措施主要以投入PSS为主,但实际上,PSS只是改善了弱阻尼模式所对应的特征值,其对系统机电振荡阻尼特性的改善主要体现在阻尼优化调节上,即优化了原系统的极点配置,并没有增加系统的总阻尼,某些情况下,还是可能会出现低频振荡现象。对低频振荡的抑制,应从一次、二次系统统筹考虑,并充分运用现有新技术,研究有效的在线预警和控制方法^[12]。

参考文献

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [2] F. P. Demello. Concepts of Synchronous Machine Stability

as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System ,1969 ,88(4) :316 -329.

[3] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论 [J]. 电网技术 ,2006 ,30(10) :29 -33.

[4] 韩志勇. 电力系统低频振荡的分析和控制 [D]. 北京: 华北电力大学 ,2005.

[5] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会, 等. 基于能量角度的共振机理电力系统低频振荡分析 [J]. 电网技术 ,2007 ,31(8) :13 -16.

[6] 韩志勇, 贺仁睦, 马进, 等. 电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析 [J]. 电力系统自动化 ,2009 ,33(3) :16 -19.

[7] Lei Chen , Yong Min , and Wei Hu. An Energy - based Method for Location of Power System Oscillation Source [J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2013 ,28(3) :828 -836.

[8] 董清, 梁晶, 颜湘武, 等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法 [J]. 中国电机工程学报 ,2012 ,32(1) :

78 -83.

[9] 檀斌, 薛萬胜. 多机系统混浊现象的研究 [J]. 电力系统自动化 ,2001 ,25(2) :3 -8.

[10] Wen - Show Kao , KAO The Effect of the Low - frequency Oscillations Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizer [C]. Power Engineering Society Summer Meeting 2001.

[11] 丁蓝, 薛安成, 李津, 等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别 [J]. 电力系统自动化 ,2010 ,34(22) :24 -28.

[12] 王超, 李继红, 李颖毅, 等. 淮沪特高压投产后的华东电网低频振荡特征分析 [J]. 电力系统自动化 ,2013 ,37(18) :120 -125.

作者简介:

张 航(1994) 硕士研究生, 研究方向为交直流电网稳定性分析与控制。

(收稿日期: 2016 - 11 - 29)

(上接第 10 页)

[3] 何健, 陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用 [J]. 吉林电力 ,2011 ,15(2) :45 -49.

[4] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用 [J]. 电力建设 ,2010 ,31(12) :10 -20.

[5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用 [J]. 电力建设 ,2013 ,34(8) :105 -106.

[6] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究 [J]. 电力建设 ,2013 ,34(9) :102 -104.

作者简介:

周 唯(1982) 硕士、高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

刘翰柱(1978) 学士、高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

谢 静(1981) 硕士、高级工程师, 从事输电线路技术设计工作;

梁 明(1973) 学士、教授级高级工程师, 从事输电线路技术研究及设计工作。

(收稿日期: 2016 - 12 - 10)

(上接第 18 页)

确动作。系统会根据当前电流刷新参考值, 使极线电流在重启过程中存在一定扰动。

4) 为保证接地极线路在故障过电压下不发生闪络, 建议招弧角间隙距离应至少增大到 560 mm。

参考文献

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社 ,2004.

[2] 王彪, 王渝红, 丁理杰. 高压直流输电接地电极及相关问题综述 [J]. 电力系统及其自动化学报 ,2012 ,24(1) :66 -72.

[3] 赵杰, 何金良. 特高压和高压直流输电系统共用接地

极模式分析 [J]. 中国电力 ,2007 ,40(10) :45 -47.

[4] 张劲松. 高压直流输电共用接地极主要设计原则 [J]. 中国电力 ,2007 ,40(6) :48 -50.

[5] 张冯硕, 吴高波, 李健, 等. 特高压直流接地极线路绝缘配合研究 [J]. 电力建设 ,2015 ,36(2) :86 -90.

[6] 陈灿灿, 刘茂涛, 宋述波. ±800 kV 云广直流“12. 15”事故原因分析及防范措施 [J]. 电力系统自动化 ,2013 ,37(23) :125 -129.

作者简介:

雷 潇(1988) 博士、工程师, 主要从事电力系统过电压与接地技术研究工作。

(收稿日期: 2016 - 12 - 03)