

DOI: 10.7667/PSPC160247

计及火电机组 OPC 保护模型的电力系统机电动态仿真分析

夏德明¹, 侯凯元¹, 安宁², 徐兴伟¹, 岳涵¹, 邵广惠¹

(1. 东北电网有限公司, 辽宁 沈阳 110180; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 首先论证了电力系统机电暂态仿真程序中考虑火电机组 OPC 保护模型的必要性。通过对东北典型火电机组超速保护 OPC 动作特性的实际调研, 在电力系统分析综合程序(PSASP)中搭建了 OPC 保护相应的数学模型, 并通过东北电网典型事故实际仿真对比验证了模型的正确性。最后, 结合东北电网实际的频率稳定问题案例对火电机组 OPC 机网协调管理提出了相应的建议和整改措施。针对具有较大孤网风险的局部地区电网, 建议采取调整火电机组 OPC 保护动作定值、优化 OPC 保护在系统频率上升和下降阶段的控制策略等措施, 以提高其孤网运行成功的概率。

关键词: 超速保护; 机网协调; 电力系统; 动态仿真; 频率稳定; 仿真模型

Power system electromechanical dynamic simulation considering thermal power OPC protection model

XIA Deming¹, HOU Kaiyuan¹, AN Ning², XU Xingwei¹, YUE Han¹, SHAO Guanghui¹

(1. Northeast China Grid Company Limited, Shenyang 110180, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Firstly, it is demonstrated that thermal power OPC protection model needs to be considered in power system electromechanical transient simulation program. Then, the OPC protection mathematical model is built based on Power System Analysis Software Package (PSASP). Furthermore, the model is verified through dynamic simulation comparison of typical accidents in Northeast China Grid. Finally, combined with actual frequency stability cases of Northeast Power Grid, some relevant management suggestions and measures are put forward on OPC coordinated management between unit and grid. It can improve the success probability of islanding operation in local area power grid with large islanding operation risk, through adjusting the thermal power unit OPC protection action value, optimization of OPC protection strategy in system frequency rising and falling stage.

Key words: OPC; coordination between unit and grid; power system; dynamic simulation; frequency stability; simulation model

0 引言

随着电力系统进入大机组时代, 大型火电机组对转子转速稳定性要求较高, 为保护机组本身普遍装设了超速保护(Over Speed Protection Control, OPC)^[1-7]装置。在电网发生故障后的异常工况下, 如果 OPC 控制策略选择不当可能会导致电网发生频率振荡或频率失稳事故, 最终造成整个电网崩溃, 给系统带来巨大的安全隐患。

东北电网最近几年在通辽和霍林河等电厂多次发生火电机组 OPC 动作, 对系统的安全稳定运行造成了一定影响。因此深入了解火电机组 OPC 动作特性, 对火电机组 OPC 进行精确建模仿真有利于促

进机网协调控制, 提升系统仿真分析的准确性, 进一步提高电网安全稳定运行水平, 为制定科学合理的电网安全稳定控制策略奠定基础。

现有的很多大型电力系统机电暂态仿真软件并不具备模拟机组超速保护 OPC 准确动作特性的能力^[1], 给相关的仿真计算造成了很大的障碍。文献[1]利用仿真软件 EUROSTAG 的模块自定义功能建立了考虑 103%发电机超速保护的调速器模型, 使仿真结果更接近于电力系统实际。文献[4]利用 NETOMAC 程序搭建了原动机、调速器和汽轮发电机超速保护的模型。文献[5]在低阶系统频率响应模型基础上, 建立了一个包含电厂锅炉、辅机及机组控制系统的简单闭环模型, 用于电力系统频率稳定

研究。文献[6]提出一种基于安全自动装置控制的火电机组超速保护。该保护利用区域稳控系统实现信息采集、处理和命令分发,实现了安全自动装置与超速保护两者的精确配合,可达到防止同一供电区域内的多台火电机组超速保护同时动作的目的。文献[7]对小电网与主网解列后的高频高压现象进行了研究,分析了高频高压现象出现的机理,探讨了电网内发电机调速、励磁装置的控制方式以及负荷特性对高频高压风险的影响。

为更好地掌握火电机组 OPC 动作特性,实现对火电机组 OPC 进行精确建模仿真,东北电网有限公司与中国电力科学研究院合作,对东北典型火电机组 OPC 的动作特性进行了调研,结合调研在电力系统分析综合程序(PSASP)中搭建了相应的数学模型,并通过与实际动作对比验证了模型的正确性。

1 火电机组 OPC 保护及仿真模型构建

OPC 保护是在发电机转速超过一定限制,或者

负荷不平衡度超过一定限制,取得调节系统的控制权,强行将调节汽门短时关闭,经过一定的延时,转速控制交由调节系统,以避免机组转速过高。发电机组并网运行时,如果 OPC 控制策略选择不当,不仅无法实现对发电机本身的超速保护,而且会使汽门频繁开关,产生“乒乓”现象,给机组轴系和热力系统造成频繁冲击,严重影响机组安全,甚至可能使电网大规模地甩负荷,发生频率振荡或频率失稳事故,最终造成整个电网崩溃。

由于 OPC 信号作用于汽轮机的高中压调节门,所以有必要对汽轮机进行详细建模,便于 OPC 控制信号的接入。汽轮机模型可以包括高压缸前汽室容积环节、高压缸做功环节、再热器容积环节、中压缸做功环节、连通管容积环节、低压缸做功环节以及功率过调系数等部分,可根据实际的汽轮机结构组合成汽轮机的模型。考虑 OPC 保护的具体汽轮机模型如图 1 所示。

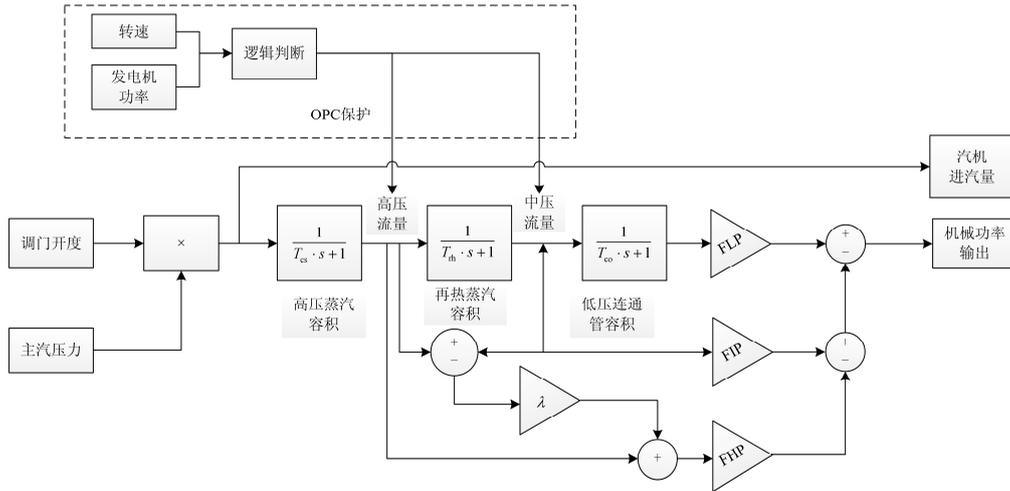


图 1 考虑 OPC 保护的汽轮机模型图

Fig. 1 Turbine model considering OPC protection

通过实际调研,火电机组 OPC 保护模型,考虑的控制方式主要如下:

- 1) 同时考虑转速和转速变化率,两者也可只选择一项;
- 2) 考虑负荷不平衡功能,采用原动机模型高中压缸入口功率和电磁功率计算。

OPC 动作后,一般同时关闭高压调节门和中压调节门,也可能存在不关闭高压调节门的情况。OPC 动作后恢复,考虑了两个条件,第一个是延迟时间,第二个是达到的转速值。在 OPC 动作过程中,控制系统可以将调速器模型中的功率给定设置为 0,

OPC 模型中也考虑了此功能。电力系统分析综合程序(PSASP)中设计的 OPC 模型设置界面具体如图 2 所示。

2 仿真分析

2010 年 2 月 24 日晚,通辽地区电网重要对外输电联络线 500 kV 科沙#1、#2 线间隔 3 min 相继发生 BC 相间故障跳闸,对电网安全稳定运行造成了较大影响。为校核东北电网 PSASP 程序生产仿真数据及模型的准确性,对上述故障过程进行了仿真对比分析。



图2 PSASP 中的 OPC 保护设置界面

Fig. 2 OPC protection interface settings on PSASP

19:25, 500 kV 科沙第一回线路 BC 相故障跳闸时, 对系统冲击较小, 各火电机组未达到 OPC 动作定值。如图 3 所示, PSASP 程序仿真曲线与 PMU 实测数据吻合度比较好, 说明现有仿真程序模型和电网数据可以比较准确地反映电网机电暂态特性。

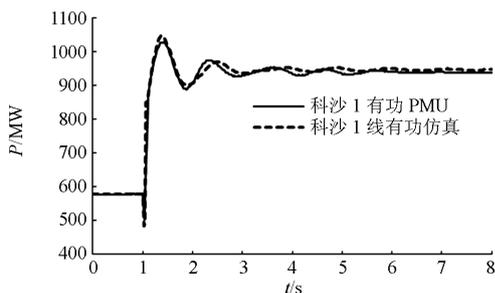


图3 科沙第一回线故障仿真对比曲线

Fig. 3 Keshu first loop fault simulation contrast curve

19:28, 500 kV 科沙第二回线路 BC 相故障跳闸时, 通辽电厂#5 机组、霍林河坑口电厂#1 机组因转速加速度达到保护定值(70 r/min/s)而动作。在 19:25 故障仿真数据基础上, 对霍林河坑口电厂#1 机组、通辽电厂#5 机组配置了 OPC 保护, 主要仿真对比结果如图 4—图 6 所示, 从对比曲线可以看出, 仿真结果和 PMU 实测结果基本一致, 说明本文搭建的 OPC 模型能够较准确地反映机组 OPC 动作特性。

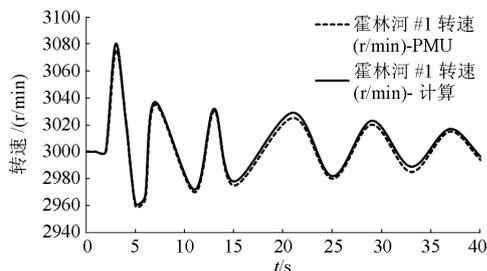


图4 PMU 实测与仿真发电机转速对比曲线

Fig. 4 Generator speed contrast curve between PMU and simulation

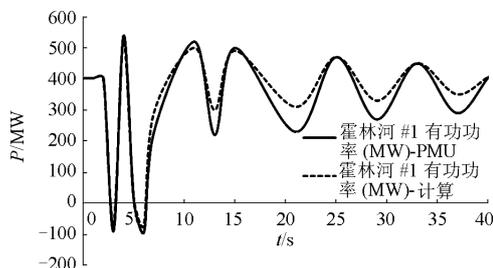


图5 霍林河电厂 PMU 实测与仿真有功功率对比曲线

Fig. 5 Active power contrast curve of Huolinhe power plant between PMU and simulation

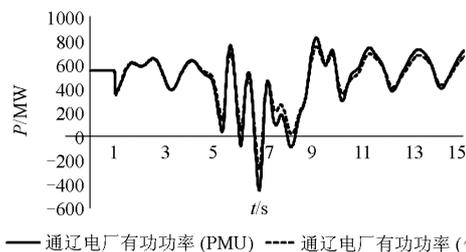


图6 通辽电厂 PMU 实测与仿真有功功率对比曲线

Fig. 6 Active power contrast curve of Tongliao power plant between PMU and simulation

3 OPC 机网协调管理

虽然 OPC 保护是为保护机组自身设置的, 但由于其对电力系统的安全稳定影响较大, 必须根据系统承受能力和实际需要优化其控制策略, 保证网源协调配合。

2012年, 东北-华北联网工程高岭直流扩建工程完成后, 东北向华北最大输电能力达到3000 MW, 接近东北电网低谷负荷的十分之一, 仿真分析表明: 低谷时段如发生直流 4 个单元闭锁, 东北电网将面临全网高频问题, 不考虑安全自动装置动作及高频切机措施, 系统最高频率可能达到 50.85 Hz, 期间频率加速度对应的机组转速加速度将达到 144 r/min/s 以上, 可能引发全网火电机组 OPC 保护无序动作。为此, 东北电网对全网的火电机组 OPC 保护进行了全面的排查, 并下发了整改通知, 要求各发电厂发电机组 OPC 超速保护的转速定值最低不低于 3090 r/min, 转速加速度定值最低不低于 250 r/min/s, 对于具备条件的电厂, 建议取消 OPC 转速变化率的限制。目前有关电厂已经完成整改, 系统故障或频率变化时发电机组 OPC 保护无序动作的风险得到有效控制。

此外, 具有较大与主网解列孤网运行风险的局部地区电网, 一旦事故孤网运行, 由于系统惯性较小, 频率稳定性差, 频率变化速度快, 如控制不当

极易诱发机组 OPC 保护与低频减载交替动作, 最终发生损失负荷甚至大面积停电事故。在发生系统单运时, 如果火电机组的 OPC 保护与机组一次调频、频率保护、高频切机、低频减载装置不能很好地配合, 将导致系统频率失稳, 甚至全网停电^[8-10]。近年来, 风电、光伏发电等清洁能源的迅猛发展不仅增加了电网的不确定和波动性, 而且降低了系统的转动惯量^[11], 使电网频率稳定面临的形势更趋复杂。

建议调整有孤网运行风险地区的火电机组 OPC 控制策略: 1) 调整 OPC 动作转速, 有条件时适当提高 OPC 保护的動作值, 给事先配置的稳控装置及高频切机措施预留充足的时间, 实现差额功率的精确匹配; 2) 将各台机的 OPC 保护动作定值适当错开, 避免在同一转速下同时动作, 扩大事故; 3) 进一步探索优化 OPC 保护在系统频率上升和下降阶段的控制策略, 避免汽门的频繁启闭和“乒乓”现象。

4 结论

本文在电力系统分析综合程序(PSASP)的基础上搭建了 OPC 仿真模型, 通过仿真对比验证了所搭建 OPC 模型的准确性。火电机组的 OPC 保护实现与系统的频率协调优化控制势在必行, 本文结合东北电网实际频率稳定问题案例对火电机组 OPC 机网协调管理提出了相应的建议和改进措施。

准确的仿真工具是进行电力系统安全稳定分析的基础, 随着电力系统中新设备、新技术^[12-19]的不断应用以及新问题的不断出现, 亟需不断完善我们的仿真工具, 以保证仿真的精度和满足电力系统实际安全稳定分析的需求。

参考文献

[1] 徐衍会, 贺仁睦, 孔祥云. 调速系统超速保护控制对电力系统稳定的影响[J]. 现代电力, 2006, 23(6): 6-9.
XU Yanhui, HE Renmu, KONG Xiangyun. The effect of overspeed protection control on power system stability[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(6): 6-9.

[2] 田丰, 陈兴华, 罗向东. 完善机组涉网控制提高电网可靠性[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 116-119.
TIAN Feng, CHEN Xinghua, LUO Xiangdong. Perfect of unit control functions with grid to improve reliability of grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 116-119.

[3] 王峥, 李伟, 李小林, 等. 汽轮发电机组甩负荷过程中主要控制系统的设计与优化[J]. 热力发电, 2014, 43(1): 106-109.

WANG Zheng, LI Wei, LI Xiaolin, et al. Realization of main automatic control in load rejection test for turbine power plants[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(1): 106-109.

[4] 邓婧, 李兴源, 魏巍. 汽轮机超速保护控制系统的性能优化及其对电网频率的影响分析[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 50-56.
DENG Jing, LI Xingyuan, WEI Wei. Optimization of over-speed protection controller for steam turbine and its influence on frequency of power grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 50-56.

[5] 刘克天, 王晓茹. 电厂锅炉及辅机对电力系统动态频率影响的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 53-58.
LIU Ketian, WANG Xiaoru. Simulation study of influences of power plant's boiler and auxiliaries on power system dynamic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 53-58.

[6] 陈兴华. 基于安全自动装置控制的火电机组改进超速保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 150-154.
CHEN Xinghua. Improved OPC by automatic-security device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 150-154.

[7] 滕子非, 张华, 汤凡, 等. 偏远地区小电网与主网解列后高频高压风险及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 129-136.
TENG Yufei, ZHANG Hua, TANG Fan, et al. Over-frequency and overvoltage risk of isolated small power grid in remote area and its suppression strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 129-136.

[8] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-154.
ZHANG Jianming, BI Tianshu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-154.

[9] 杨琦, 唐晓骏, 苏寅生, 等. 机组涉网保护与高频切机措施优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 127-131, 135.
YANG Qi, TANG Xiaojun, SU Yinsheng, et al. An optimal allocation scheme for relay setting related to power grid and over frequency generator tripping measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 127-131, 135.

[10] 吴国旻, 宋新立, 鞠平, 等. 大型核电机组涉网保护与电网安全自动装置的协调控制原则[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 178-183, 188.

- WU Guoyang, SONG Xinli, JU Ping, et al. Coordination and control principle between grid-related protection of large-scale nuclear units and security automatic devices of power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 178-183, 188.
- [11] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
- BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunling, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [12] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [13] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [14] 郑建涛, 徐越, 许世森. 太阳能-燃气联合循环发电技术[J]. 热力发电, 2014, 43(8): 24-28.
- ZHENG Jiantao, XU Yue, XU Shisen. An overview of integrated solar combined cycle technology[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(8): 24-28.
- [15] 冯爽, 孟祥辉, 赵新飞. 风储联合发电系统运行性能研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 16-20.
- FENG Shuang, MENG Xianghui, ZHAO Xinfei. Research on operation characteristics of wind-ES hybrid power system[J]. Shanxi Electric Power, 2014, 42(12): 16-20.
- [16] 苏新霞, 王致杰, 陈丽娟. 柔性直流输电特点及应用前景研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(5): 35-39, 73.
- SU Xinxia, WANG Zhijie, CHEN Lijuan. Study on VSC-HVDC and its application prospect[J]. Shanxi Electric Power, 2014, 42(5): 35-39, 73.
- [17] 盖佳麒, 赵龙安. 微网运行控制策略的研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(11): 13-18.
- GAI Jiaqi, ZHAO Longan. Study on comprehensive control strategies of microgrid[J]. Shanxi Electric Power, 2014, 42(11): 13-18.
- [18] 肖曦, 摆念宗, 康庆, 等. 波浪发电系统发展及直驱式波浪发电系统研究综述[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 1-11.
- XIAO Xi, BAI Nianzong, KANG Qing, et al. A Review of the development of wave power system and the research on direct-drive wave power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 1-11.
- [19] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
- WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

收稿日期: 2016-03-01; 修回日期: 2016-05-04

作者简介:

夏德明(1979-), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行、安全稳定分析与控制; E-mail: xdm98@mails.tsinghua.edu.cn

侯凯元(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全运行分析与控制;

安宁(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统建模、计算程序开发及电网运行分析。

(编辑 周金梅)