

660 MW 汽轮发电机失磁后稳态异步运行过程分析

薛磊¹, 陈远志², 寇水潮¹, 孙钢虎¹, 兀鹏越¹, 焦尚彬³

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 中国电力工程顾问集团公司, 北京 100120;
3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 某电厂 660 MW 汽轮发电机因失磁故障进入稳定异步运行, 发电机的机端参数和阻抗轨迹呈现有规律的振荡。分析了事故中发电机失磁后进入异步运行的过程。并针对这起事故, 采用 Matlab 建立仿真模型, 研究了大型火电机组中励磁回路的结构、发电机失磁前所带的负载、发电机的转动惯量以及发电机铁芯的空载特性 4 个因素对发电机失磁过程的影响。仿真结果和实际案例较为一致, 说明了仿真模型的正确性。仿真结果对大型发电机组的失磁保护有一定的参考意义。

关键词: 发电机; Simscape; 仿真; 失磁; 异步阻抗圆

Analysis of stable asynchronous running of 660 MW turbine generator for loss of excitation

XUE Lei¹, CHEN Yuanzhi², KOU Shuichao¹, SUN Ganghu¹, WU Pengyue¹, JIAO Shangbin³

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A 660 MW turbine generator entered a stable asynchronous running state due to loss of excitation and the generator's parameters and impedance trajectories showed regular oscillations. This paper analyzes the above process. According to the accident, a simulation model is built using Matlab to study the influence of the four factors on the process of loss of excitation, including the structure of the excitation circuit, the load before loss of excitation, the moment of inertia of the generator, and the no-load characteristic of the iron core in large-scale thermal power generating unit. The simulation results are in good agreement with those from actual case, and the correctness of the simulation model is illustrated. Simulation results have some reference significance for the loss of excitation protection of large generating units.

This work is supported by Industrial Key Project of Shaanxi Province (No. 2017GY-030).

Key words: generator; Simscape; simulation; loss of excitation; asynchronous impedance circle

0 引言

大型发电机组的涉网保护是电网安全稳定运行的保障^[1-3]。其中, 发电机的失磁(Loss of Excitation, LOE)对电力系统的稳定和发电机本身的安全都有不利的影 响, 失磁故障应尽可能快地被发现并排除, 但是目前实际工程中失磁保护还是误动率比较高的一种保护^[4]。出现这种情况的一个重要原因就是工程技术人员对失磁过程了解不够深入, 对失磁过程各种因素影响的理解还不够准确, 尤其是对实际事故过程的深入剖析还比较欠缺。

由于特别的原因, 一次事故中某厂 1 号发电机带负荷运行中励磁完全失去后, 机组仍然维持了 11 min 的稳态异步运行, 留下了宝贵的波形数据。

本文通过 Simscape 工具箱对本次事故过程建模仿真, 深入研究了事故过程, 对发电机失磁保护的应用具有较好的参考意义。

1 失磁故障案例

1.1 系统概况

某厂 1 号机组整套启动调试过程中, 进行欠励磁试验时, 因励磁调节器故障, 励磁开关动作跳闸, 发电机开始失磁运行。因试验中失磁保护的功能压板退出, 保护未动作, 发电机失磁运行了约 11 min 后,

试验人员手动停机。

1号机励磁系统采用的是GE公司的EX2100e励磁装置,该装置未配置跨接器模块,因此失磁后励磁绕组的结构如图1所示。

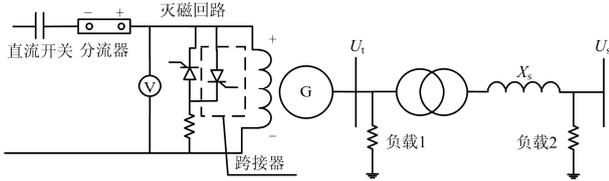


图1 电网的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grid

其中1号机组发电机的参数如表1所示。

表1 发电机参数

Table 1 Parameters of the generator

名称	数值	名称	数值
发电机功率/MW	660	直轴瞬变电抗/p.u.	0.336
发电机电压/kV	20	交轴瞬变电抗/p.u.	0.485
变压器容量/MVA	780	直轴超瞬变电抗/p.u.	0.251
定子额定电流/kA	21.169	交轴超瞬变电抗/p.u.	0.247
直轴同步电抗/p.u.	2.38	直轴开路瞬变时间常数/s	8.61
交轴同步电抗/p.u.	2.32	交轴开路瞬变时间常数/s	0.956

1.2 失磁过程记录

失磁前,发电机的有功功率为239 MW,无功功率为54 Mvar,机端电压为19.57 kV,定子电流为7 105 A。灭磁开关跳闸发电机完全失磁后100 s时间内的有功功率、无功功率、机端电压、定子电流和转速的变化波形如图2所示。

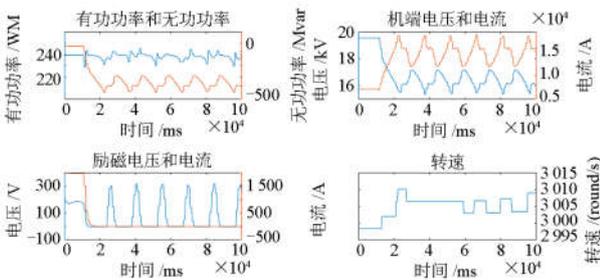


图2 失磁后机端参量实测波形

Fig. 2 Waveform measured after LOE

从图2中可以看出,发电机的参数都在周期性地变化,波动周期约为15 s。发电机有功功率的平均值基本维持不变;无功功率由发出无功变为从电网中吸收大量感性无功,约为300 Mvar;机端电压从20 kV下降到17 kV。因为发电机从电网中吸收大量无功,定子电流大幅跃升,约为15 000 A。因为分流器处于灭磁装置的外侧,所以灭磁开关断开之后,分流器上没有电流流过,一直为零。励磁电

压随着周期性滑极的出现而呈现周期脉动的形状。发电机转速因为DEH采样频率偏低而呈现离散的阶梯形。

发电机失磁后机端阻抗轨迹如图3所示,机端阻抗基本沿着等有功圆进入异步圆^[5-6],最后在异步圆($X'_d/2 = 2.29 \Omega$, $X_d = 32.47 \Omega$)内沿着等有功圆来回振荡。

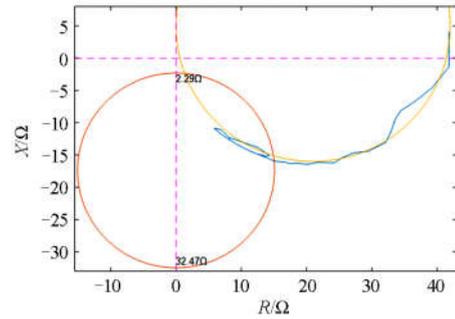


图3 失磁后机端阻抗轨迹实测波形

Fig. 3 Impedance trajectory after LOE

2 仿真模型的建立及仿真结果

2.1 仿真模型的建立

为了深入分析发电机完全失磁后的运行过程,采用Matlab对1号机组的失磁过程进行了仿真分析。

本文采用Matlab/Simulink中的Simscape工具箱,其适用于包含机械、液压、热动、气动、电气、电磁场等物理过程的多域联合建模仿真^[7]。不同于其他的Simulink模块采用信号及传递函数来代表物理模型,Simscape直接采用物理模型进行仿真,仿真结果更接近于真实情况。本文按照单机-无穷大系统模型进行建模仿真,如图4所示,仿真模型中的元件参数如表1所示。

2.2 事故过程仿真

通过Powergui或其他稳态分析工具,计算得到系统的稳态值(发电机有功为244 MW,无功为40.1 MVA,机端电压为20.2 kV),并赋值给Simscape模型,从而使仿真模型从稳态开始运行。失磁之前,发电机带有36%的负荷。运行到第1 s时,励磁开关跳开,发电机进入失磁运行状态,持续时间为50 s。

通过仿真,1号机组33%负荷下失磁过程后的有功功率、无功功率、机端电压电流和励磁电压电流的变化如图5所示。可见,发电机各参量的变化规律与图2基本一致。

发电机完全失磁后机端参量周期性变化的原因是因为同步发电机转子结构并不像鼠笼式异步电机呈现较好的圆周对称结构,异步运行的同步发电

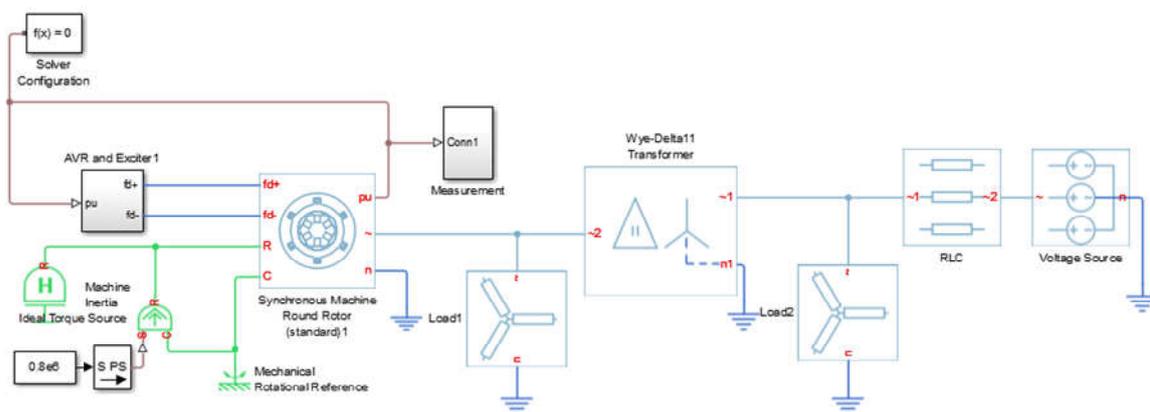


图4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

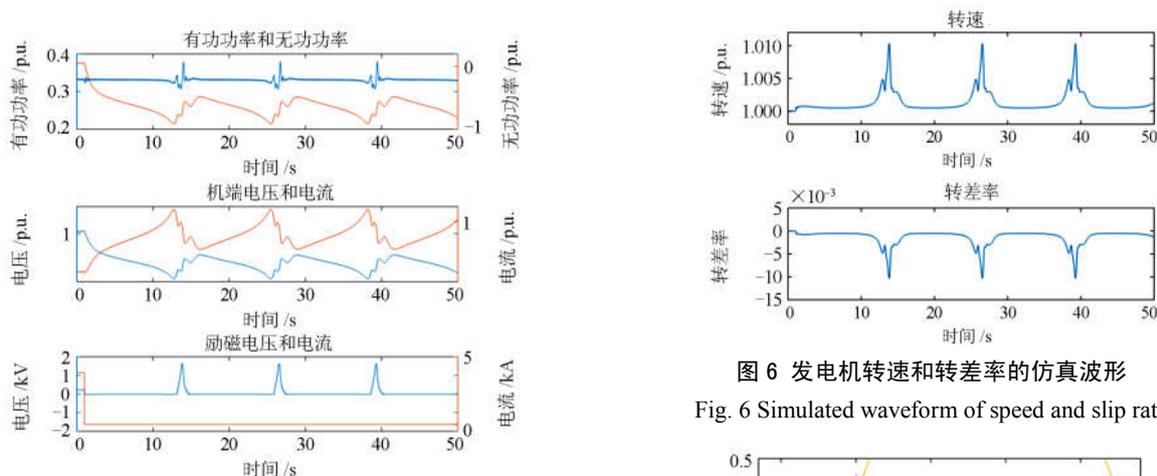


图5 发电机机端参数的仿真波形

Fig. 5 Simulated waveform of generator

图6 发电机转速和转差率的仿真波形

Fig. 6 Simulated waveform of speed and slip rate

机每隔一段时间就要经历一次滑极过程, 发电机转子上的感应电压反向, 感应电流也要经历一次换向过程。有功功率、无功功率、机端电压和定子电流也随之呈现周期波动。

失磁之后, 发电机开始超速, 但因为受励磁绕组和转子表面感应电流的耦合作用, 转差一般较小, 转速和转差率的仿真结果如图6所示。虽然转差率随时间波动, 但平均值为一定值, 这是发电机进入稳定异步运行的特征^[8-9]。

当发电机进入到稳定异步运行状态后, 阻抗轨迹基本沿着等有功圆在A点和B点之间来回振荡。振荡的过程实则为滑极的过程, 其中滑极过程中有功功率的波动使阻抗轨迹短暂离开等有功圆, 无功功率的波动幅度决定了阻抗轨迹振荡范围AB的大小。

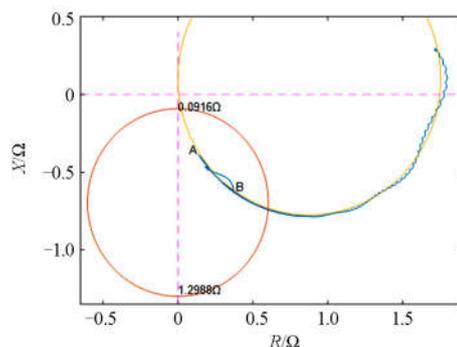


图7 机端阻抗轨迹的仿真波形

Fig. 7 Simulated waveform of impedance trajectory

由图5—图7的仿真波形来看, 与图2、图3的实际故障波形比较一致, 验证了仿真模型的正确性。因此, 可以利用本文的仿真模型对发电机失磁后的异步运行过程进行进一步的分析研究。

3 机端阻抗轨迹的影响因素分析

基于阻抗原理的失磁保护是目前发电机失磁保护的主要判据, 阻抗判据有静稳圆判据和异步圆

判据。由于发电机失磁以后，机端阻抗轨迹必进入异步圆，而且，发电机和电网联系越来越紧密，系统联系电抗越来越小，因此，近年来采用异步圆作为失磁保护主判据的情况越来越多。

鉴于异步圆判据在失磁保护中的重要性，研究发电机失磁进入稳态异步运行阶段以后发电机机端阻抗轨迹的变化特征，对提高失磁保护动作的准确性和正确性有重要意义。本文通过 Simscape 工具箱来研究励磁回路结构、负载、惯性时间常数等因素对发电机失磁后进入稳态异步运行时的阻抗轨迹的影响。

3.1 励磁回路结构的影响

通过修改励磁绕组回路结构，可以得到发电机在励磁绕组开路(没有灭磁回路和跨接器)、短路(有灭磁回路和跨接器)两种情况下失磁后机端测量参数的变化。

发电机(负载率为 36%)因励磁绕组开路失磁的情况，发电机机端阻抗轨迹如图 8 所示。

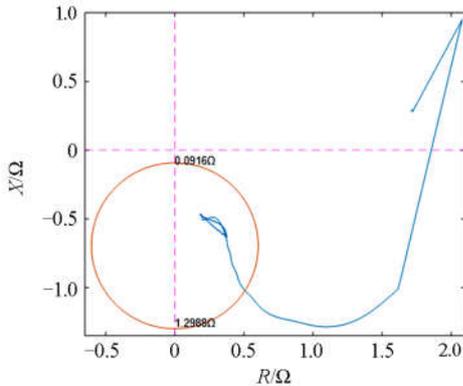


图 8 励磁绕组开路时的失磁仿真结果

Fig. 8 Simulation results with the excitation circuit open

因为励磁绕组开路，转子只通过表面的感生电流与定子绕组发生耦合作用。励磁绕组上的感生电压幅值很大，既有正极性也有负极性，并随着滑极过程变换电压极性。因为转子和定子之间的磁耦合能力较弱，发电机必须在较大的转差率下维持稳定异步运行状态^[10-11]，如图 9 所示。此时，发电机机端参量振荡的频率更高。

发电机失磁后，同时投入灭磁回路和跨接器，感生电流在励磁回路中可以双向流通，机端阻抗轨迹如图 10 所示。与失磁后未投入跨接器(只投入灭磁回路)相比，振荡幅度更小，从图 10 中也可以看到，机端阻抗轨迹在异步阻抗圆内几乎和等有功圆重合。异步运行过程中，转子绕组上几乎没有感生电压，异步运行的转差率在三种情况中最小，转差率如图 9 所示。这种情况对发电机的安全运行最有利。

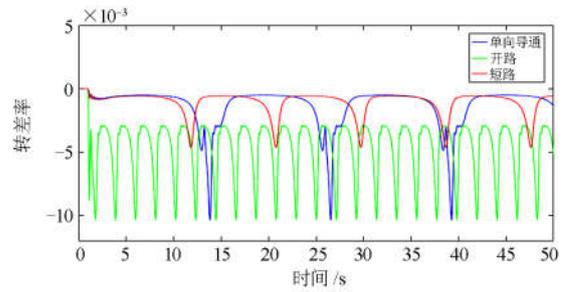


图 9 励磁回路不同情况下发电机异步运行的转差率
Fig. 9 Slip rate of generator when asynchronous running with different excitation circuit

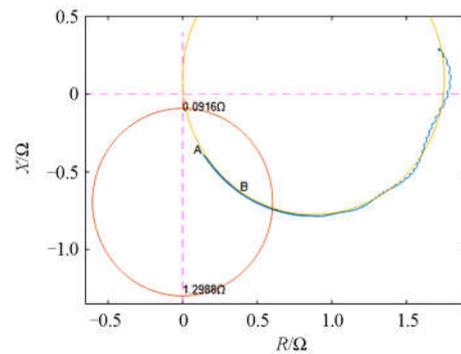


图 10 励磁绕组双向导通时的失磁仿真结果

Fig. 10 Simulation results with the excitation circuit short

3.2 发电机负载的影响

发电机异步运行时的特性曲线如图 11 所示。图中横轴 s 表示发电机异步运行时的转差率，纵轴 m/m_e 表示原动机的动力矩。

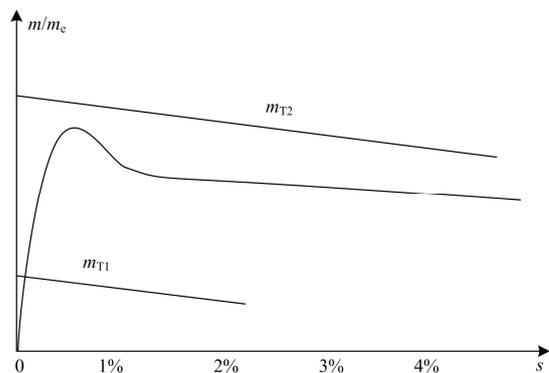


图 11 汽轮发电机的异步运行特性曲线^[12]

Fig. 11 Asynchronous characteristics of the turbo-generator

如果失磁前发电机的负载较小，则失磁后，原动机的调节特性与平均异步转矩曲线的上升段相交，如图 11 中 m_{T1} 所示，此时发电机能在较小的转差率下维持稳定异步运行。机端阻抗的轨迹一般从靠近于 $-jX_d$ 点处进入异步阻抗圆，如图 12 中曲线

1 所示, 发电机负载率约为 15%。

如果失磁前发电机负载较重, 原动机的转矩特性则如图 11 的 m_{T2} 所示, 发电机将在机械转矩的作用下持续加速运动, 无法保持稳定异步运行^[13-15]。仿真发电机在带有 60% 额定负载时失磁的情况, 得到其机端阻抗轨迹, 如图 12 中曲线 2 所示。机端阻抗最终在 $-jX'_d$ 附近摆动, 因为异步阻抗圆在 Y 轴上的上端点为 $-jX'_d/2$, 所以机端阻抗轨迹仍在异步阻抗圆内。在重负荷下失磁后, 必须降低发电机有功功率, 否则将危及机组的安全运行。

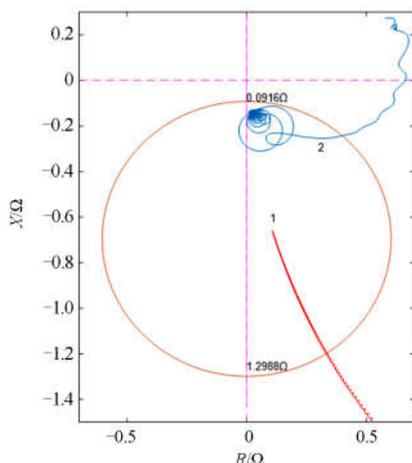


图 12 失磁前重载和轻载时的仿真结果

Fig. 12 Simulation results when heavy load and light load

3.3 发电机惯性时间常数的影响

发电机的惯性时间常数 T_J 是对发电机动态过程影响十分关键的一个参数, 尤其是在滑极过程中, 转子磁极和定子磁极非常接近, 转子的运动受发电机轴系的转动惯量影响很大。当以发电机额定功率为功率基值时, T_J 一般为 2~10 s; 对于汽轮机组, 惯性时间常数随着额定功率的增加而减小^[16-18]。事故案例中, 发电机转子转动惯量为 9 500 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 汽轮机高压转子部分的转动惯量为 1 223 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 汽轮机中压转子部分的转动惯量为 3 733 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 低压转子部分的转动惯量为 29 334 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 则可得到发电机总的惯性时间常数为 5.89 s。当发电机惯性时间常数分别为 5.89 s 和 10 s 时, 仿真失磁后的机端阻抗轨迹如图 13 所示。

如果发电机惯性时间常数较大, 则发电机异步运行过程中发生滑极时, 有功功率振荡幅度较大, 持续时间也较长, 阻抗轨迹围绕等有功圆上下振荡; 如果发电机惯性时间常数较小, 则滑极过程中, 有功功率振荡幅度较小, 持续时间较短, 阻抗轨迹和等有功圆较为接近。

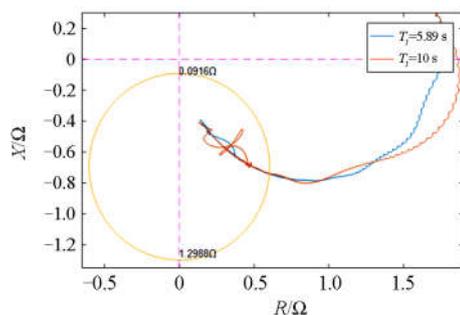


图 13 发电机惯性时间常数不同时失磁机端阻抗轨迹

Fig. 13 Impedance trajectory with different generator inertia time constant

3.4 发电机空载特性的影响

发电机的空载特性如图 14 所示; 发电机磁路的饱和系数为: $k_\mu = CB/CA$, 一般汽轮发电机在空载额定电压时的 k_μ 值在 1.1~1.25 左右^[19-20]。

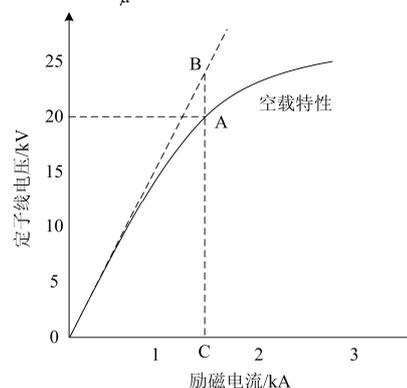


图 14 发电机的空载特性曲线

Fig. 14 Generator no-load characteristic curve

通过仿真 ($T_J=10$ s), 可以得到发电机在 k_μ 分别为 1.1 和 1.25 时的失磁后机端阻抗的运动轨迹, 如图 15 所示。失磁之后, 阻抗轨迹进入异步圆的深度取决于所吸收无功的大小。发电机稳定异步运行的转差率在铁芯饱和时较非饱和时大^[21-23], 所吸收的

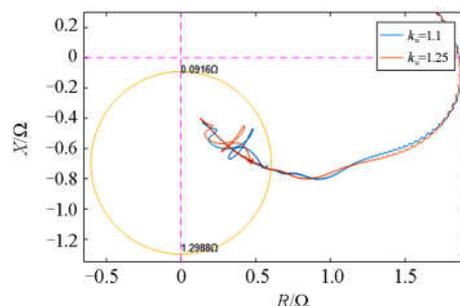


图 15 铁芯饱和系数不同时失磁机端阻抗轨迹

Fig. 15 Impedance trajectory when the core saturation coefficient is different

感性无功也较大,因此进入异步阻抗圆的深度也较大。相反,如果发电机铁芯饱和不严重,吸收的感性无功较小,则进入阻抗圆的深度也较小。

4 结论

本文分析了一起 660 MW 汽轮发电机失磁故障,并采用 Matlab/Simulink 中的 Simscape 工具箱建立仿真模型,仿真结果和实际较为一致。通过仿真,研究了大型火电机组中励磁回路的结构、发电机的负载、发电机的转动惯量以及发电机空载特性 4 个因素对发电机失磁过程的影响。通过分析,可以得到以下结论:

1) 虽然汽轮发电机失磁之后的机端阻抗轨迹和励磁回路的结构、负载、转动惯量以及空载特性等相关,但是如果发电机失磁之后能够进入稳定异步运行,则机端阻抗轨迹必然进入异步阻抗圆,并且进入异步阻抗圆的位置随异步运行滑差的大小而不同。

2) 本文事故案例中,失磁后发电机机端阻抗轨迹进入到异步阻抗圆内,如果投入失磁保护压板,则失磁保护会正确动作。

3) 通过比较励磁回路和发电机负载对失磁过程的影响,失磁之后,应该投入灭磁装置和跨接器,并迅速减负荷,使发电机失磁后能进入稳定异步运行,并减小异步运行中的周期波动。

4) 本文采用 Simscape 工具箱建立仿真模型,较好地重现了实际的失磁过程,可以在此基础上进一步开展发电机失磁保护和失步保护配合的研究。

参考文献

- [1] 林莉,张向伍,郭文字,等.同步发电机失磁过程分析与保护方法研究[J].高电压技术,2014,40(11):3544-3553.
LIN Li, ZHANG Xiangwu, GUO Wenyu, et al. Analysis on loss-of-excitation process and research on protection method of synchronous generators[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3544-3553.
- [2] 国家能源局.大型发电机变压器继电保护整定计算导则:DL/T 684—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
National Energy Commission. Guide of calculating settings of relay protection for large generator and transformer: DL/T 684-2012[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [3] IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for AC generator protection: IEEE Std C37.102—2006[S].
- [4] 汪静,余高旺.华东电网并网机组涉网保护相关标准及核查问题分析[J].电力工程技术,2017,36(5):66-70.
WANG Jing, YU Gaowang. Analysis of related standards and verification problems of grid-related generator protection in state grid east china branch[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 66-70.
- [5] 王维俭,桂林,王雷,等.发电机失磁保护阻抗元件定值整定的再讨论[J].电力自动化设备,2009,29(12):1-3.
WANG Weijian, GUI Lin, WANG Lei, et al. Re-discussion of setting calculation for impedance of generator loss-of-excitation protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 1-3.
- [6] 隋佳音,毕天姝,薛安成,等.新型发电机失磁保护加速判据研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(20):69-73.
SUI Jiayin, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. A novel accelerated criterion for loss of field protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 69-73.
- [7] 高兴泉,王立国.基于SIMULINK/SIMSCAPE的计算机控制系统仿真实验平台[J].实验技术与管理,2013,30(9):88-92.
GAO Xingquan, WANG Ligu. Simulation experiment platform for computer control system based on SIMULINK/SIMSCAPE[J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(9): 88-92.
- [8] 张旭东.不同原理的发电机失磁保护误动分析与改进[J].电力系统自动化,2001,25(6):63-65.
ZHANG Xudong. Analysis of mis-operation of protection for loss of excitation and its improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 63-65.
- [9] 刘桂林,宋玮,宋新立.基于涉网保护的励磁限制、失磁保护与失步保护配合的研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(23):107-112.
LIU Guilin, SONG Wei, SONG Xinli. Research on coordination of low excitation limit, loss of excitation and out-of-step protection based on grid-related protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 107-112.
- [10] 樊波,牛天林,薛钧义.基于MATLAB的发电机失磁故障仿真研究[J].电气技术,2007,4(2):60-63.
FAN Bo, NIU Tianlin, XUE Junyi. The simulation research of generator loss-of-excitation faults based on MATLAB[J]. Electrical Engineering, 2007, 4(2): 60-63.
- [11] 王道元,徐余法,梁旭彪,等.百万千瓦汽轮发电机失磁动态过程仿真分析[J].电机技术,2015(5):1-4.
WANG Daoyuan, XU Yufa, LIANG Xubiao, et al. Simulation on excitation-loss dynamic characteristic of the 1000 MW turbo-generator[J]. Electrical Machinery

- Technology, 2015(5): 1-4.
- [12] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 2版. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [13] 殷建刚, 彭丰. 发电机失磁保护的典型配置方案[J]. 继电器, 2002, 30(3): 33-36.
YIN Jiangang, PENG Feng. Research on the typical configure of generator loss of field protection[J]. Relay, 2002, 30(3): 33-36.
- [14] 解兵, 徐珂, 刘建坤, 等. 励磁调节器低励限制整定原则和整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 142-147.
XIE Bing, XU Ke, LIU Jiankun, et al. Study on the principle and setting method of low excitation limit setting for excitation regulator[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 142-147.
- [15] 郑涛, 余青蔚, 詹荣荣, 等. 调相机接入对发电机失磁保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 50-56.
ZHENG Tao, YU Qingwei, ZHAN Rongrong, et al. Impact of synchronous condenser access on generator loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 50-56.
- [16] 闵勇, 陈磊, 姜齐荣. 电力系统稳定分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [17] 何青, 李国庆, 王立健, 等. 汽轮发电机功率-负荷不平衡保护仿真分析[J]. 热力发电, 2018, 47(11): 102-108.
HE Qing, LI Guoqing, WANG Lijian, et al. Simulation of power-load unbalanced protection for turbo-generator[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 102-108.
- [18] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94-97.
YAN Wei, CHEN Jun, SHEN Quanrong. Discussion on large non salient pole generator phase advancement operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 94-97.
- [19] 高志远, 曹阳, 徐昊亮, 等. 电力系统关键技术发展刍议[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 14-17.
GAO Zhiyuan, CAO Yang, XU Haoliang, et al. Primary discussion on the key technologies development of power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 14-17.
- [20] 汪耕, 李希明. 大型汽轮发电机设计、制造与运行[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
- [21] 唐建辉, 胡敏强. 隐极同步发电机进相运行功角计算方法初探[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(3): 34-35, 37.
TANG Jianhui, HU Minqiang. A new calculation method of power angle of non-salient pole synchronous generator in under-excitation operation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23(3): 34-35, 37.
- [22] 刘晓芳, 蒙亮, 罗应立, 等. 同步发电机 d-q 轴饱和和特性曲线族[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 69-73.
LIU Xiaofang, MENG Liang, LUO Yingli, et al. The saturation curve series of synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 69-73.
- [23] MASON C R. A new loss-of-excitation relay for synchronous generators[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1949, 68(2): 1240-1245.

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-06-27

作者简介:

薛磊(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事从事发电厂电气试验及相关技术研究工作。E-mail: xueqlei@126.com

(编辑 周金梅)