

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200300

## 抽水蓄能机组 RTDS 仿真与失磁保护改进研究

贾德峰<sup>1</sup>, 王明东<sup>2</sup>, 傅润炜<sup>1</sup>, 周鹏鹏<sup>1</sup>, 张彦兵<sup>1</sup>, 李书琰<sup>3</sup>

(1. 许昌开普检测研究院股份有限公司, 河南 许昌 461000;

2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 国网许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 抽水蓄能机组具备调峰、调频、调相以及事故备用等功能, 对电网的安全稳定运行有重要的作用。抽蓄机组容量大、结构复杂、造价昂贵, 在现场和物理模型上均无法进行大量的故障及异常运行试验。基于 RTDS 搭建了抽水蓄能机组的仿真模型, 模拟机组在多种工况、多种负荷水平下的机组区内外故障及失磁等异常运行状态。证明在抽水调相工况下发生失磁时, 现有的以定子阻抗判据为主的失磁保护有缺陷, 机组励磁不能及时切换, 不利于系统的稳定运行。对仿真数据进行分析, 提出了新的改进失磁保护的 KP 阻抗圆判据, 实现了机组全工况无死区的失磁保护。该判据算法对相关继电保护从业人员具有一定的参考价值。

**关键词:** 抽水蓄能; 失磁保护; 抽水调相; RTDS

### RTDS simulation and improvement of excitation-loss protection for pumped storage units

JIA Defeng<sup>1</sup>, WANG Mingdong<sup>2</sup>, FU Runwei<sup>1</sup>, ZHOU Pengpeng<sup>1</sup>, ZHANG Yanbing<sup>1</sup>, LI Shuyan<sup>3</sup>

(1. Xuchang KETOP Testing Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. State Grid Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** A pumped storage unit has the functions of peak load, frequency, and phase regulation as well as emergency standby. Thus it plays an important role in the safe and stable operation of a power grid. Because of the large capacity, complex structure and expensive cost of a pumped storage unit, it is impossible to carry out a large number of fault and abnormal operation tests on site and physically model them. Based on RTDS, a simulation model of a pumped storage unit is built to simulate internal and external faults as well as the abnormal operation of the unit such as excitation-loss under various working conditions and load levels. It is verified that the existing stator impedance judgment criteria of excitation-loss protection is defective and the unit excitation cannot be switched in time when excitation-loss occurs under the condition of pump phase regulation. This is not conducive to the stable operation of the system. Based on the simulation analysis, a new KP impedance circle criterion is proposed to improve excitation-loss protection, so as to realize the excitation-loss protection without a dead zone in the whole working condition of the unit. The criterion can be used as a reference for relevant relay protection practitioners.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1804252).

**Key words:** pumped storage; excitation-loss protection; pumped phase modulation; RTDS

## 0 引言

抽水蓄能机组(以下简称抽蓄机组)启停快速, 且具调峰、调频、调相以及事故备用等功能, 对新能源接纳和电网的安全稳定运行有重要的作用<sup>[1-5]</sup>, 因此大型抽蓄机组的保护研究受到了人们的重视<sup>[6-10]</sup>。对发电机组故障的统计表明, 发电机保护

中失磁保护动作次数最多且误动次数较多<sup>[11-12]</sup>。目前关于发电机失磁保护原理和调相机失磁特性的研究较多<sup>[13-19]</sup>, 但对抽蓄机组失磁保护的研究很少, 文献[20]从现场运行角度分析了失磁保护动作行为。

抽蓄机组容量大、结构复杂、造价昂贵、运行工况复杂, 在现场和物理模型上均无法进行大量的故障及异常运行试验。采用电力系统实时仿真进行抽蓄机组保护逻辑的验证, 更具有经济性和可行性。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804252)

抽蓄机组仿真模型可以分别在各种工况、不同负荷水平下模拟机组故障和失磁、失步等异常运行工况, 进而实现抽蓄机组继电保护逻辑的全面考核。本文基于 RTDS 进行仿真, 证明现有的失磁保护判据在抽水调相工况下发生失磁时有缺陷, 不利于系统的稳定运行。提出了一种新的改进失磁保护的 KP 阻抗圆判据, 可实现抽蓄机组全工况无死区的失磁保护。

### 1 抽蓄机组保护配置

抽蓄机组在不同的运行工况下, 均有某些保护功能不适用或可能导致误动, 需要设置完善的保护功能闭锁逻辑<sup>[21]</sup>。表 1 为某抽蓄电站 300 MW 机组的部分保护配置, 其主保护配置大差纵差、不完全纵差、裂相横差等, 异常运行保护配置失磁、失步等。

表 1 某抽蓄机组的保护配置及功能闭锁逻辑

Table 1 Protection configuration and function locking logic of a pumped storage unit

保护功能	运行工况					被拖动
	发电	发电调相	抽水	抽水调相	拖动	
大差纵差					•	•
不完全纵差					•	•
裂相横差					•	•
失磁					•	•
失步					•	•
电动机低功率	•	•		•	•	•

注: “•”表示在该工况下闭锁保护。

### 2 失磁保护判据及保护逻辑

#### 2.1 失磁保护判据

目前失磁保护判据以定子阻抗判据和无功方向判据为主, 辅以低电压判据。

##### 1) 定子阻抗判据

在阻抗平面上, 发电机失磁前, 机端测量阻抗的轨迹位于第一象限或第四象限的稳定工作点。发电机失磁后, 机端测量阻抗的轨迹将沿着等有功阻抗圆过渡到异步边界阻抗圆内部。

##### 2) 无功方向判据

该判据针对调相机或调相工况。调相机失磁前向系统发出无功(过励状态), 完全失磁后从系统吸收无功, 无功方向发生改变, 将导致电网出现无功缺额。

#### 2.2 失磁保护逻辑

由主判据与辅助判据组合成不同的发电机失磁

保护方案, 如图 1 所示。

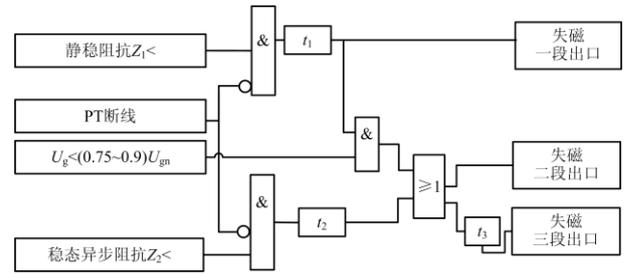


图 1 失磁保护方案逻辑框图

Fig. 1 Logic diagram of loss of excitation protection

抽蓄机组具有图 2 所示的四象限工作能力: 调相运行时, 过励状态下发出感性无功, 欠励状态下吸收感性无功。运行工况转换时其失磁保护非常复杂, 目前缺乏对抽蓄机组失磁保护的研究。

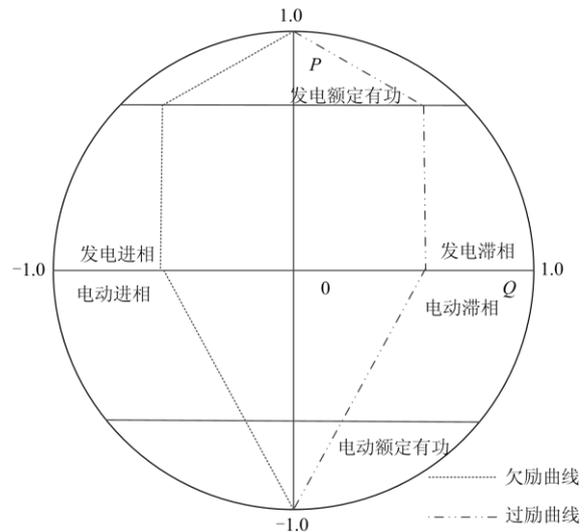


图 2 抽蓄机组四象限运行示意图

Fig. 2 Four quadrant operation of pump-storage unit

### 3 抽蓄机组 RTDS 仿真模型

#### 3.1 抽蓄机组 RTDS 建模之关键

RTDS\_PDSM\_FLT\_V4 的机端电流、中性点二分支电流以及中性点二分支零序电流均可引出, 从而不仅可以模拟相间故障, 而且可以模拟同相不同分支绕组不同位置的匝间故障。

RTDS 自带库里的机组励磁控制模型可以实现抽蓄机组正常运行工况模拟, 但不能模拟故障。本文以高压直流输电的逆变整流模型作为励磁控制模型, 能模拟失去一个或六个晶体管的触发脉冲, 实现机组低励及全失磁故障。

SFC 启动回路也是抽蓄机组一个非常重要的组成部分。抽蓄机组被 SFC 拖动从静止缓慢启动, 即

频率从 0 Hz 缓慢升到额定工频 50 Hz。SFC 启动回路与高压直流输电的逆变整流过程、虚拟同步电机<sup>[22]</sup>类似,但也有其特殊之处。本文对 SFC 启动回路的控制策略加以改进满足试验要求。

### 3.2 实例

以某抽蓄电站 300 MW 机组接入 500 kV 系统为原型,搭建了如图 3 所示的单机无穷大系统 RTDS 模型。模型包括 500 kV 电源、300 MW 发电电动机、

励磁系统、SFC 拖动系统、18 kV/ 500 kV 升压变。

使用图 3 所示的模型,可仿真并输出抽蓄机组正常运行及故障时的电流、电压的小电压信号,通过功率放大器把二次电流、二次电压模拟量施加给抽蓄机组保护装置;通过 I/O 接口发送换相开关发电机位置、机端断路器合闸位置等开关量给保护,接收其发出的跳闸信号,组成一个闭环测试系统。

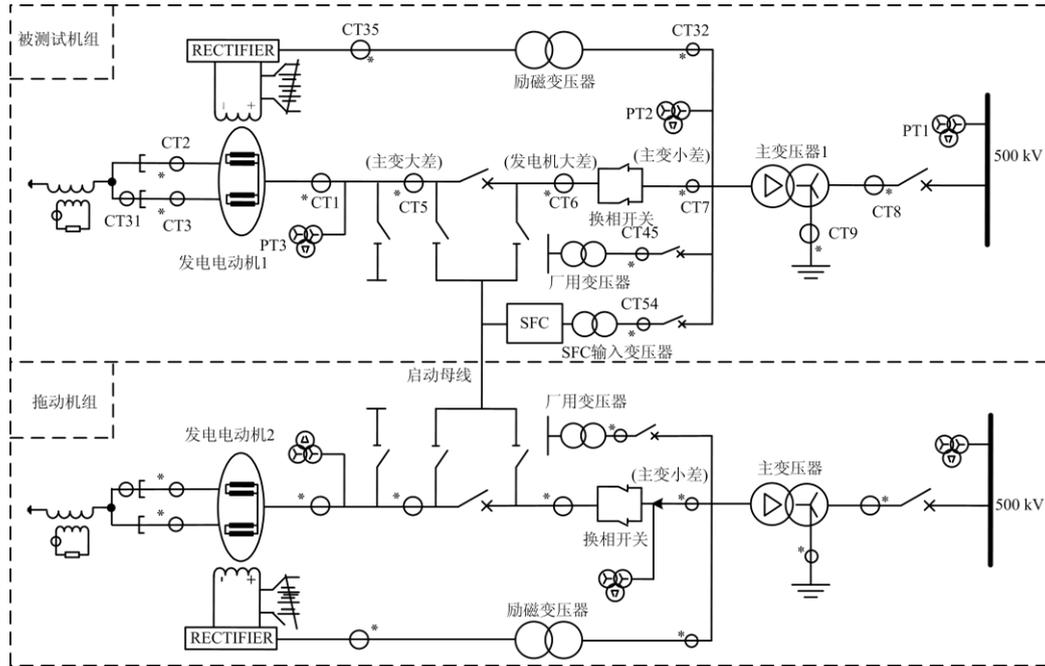


图 3 300 MW 抽蓄机组接入 500 kV 系统 RTDS 仿真模型

Fig. 3 Simulation model for a 300 MW pump-storage unit connecting to a 500 kV power system

## 4 仿真及结果分析

### 4.1 仿真试验项目

国家标准明确提出抽蓄机组失磁保护应反应励磁异常下降或消失<sup>[23]</sup>,此外还应对机组区内外故障、系统低电压等正确反应,不误动。表 2 给出了不同工况、不同负荷水平的部分试验项目。

表 2 部分试验项目

Table 2 Some test items

故障(异常)类型	运行工况			
	发电 工况/p.u.	抽水 工况/p.u.	发电调相 工况/p.u.	抽水调相 工况/p.u.
区外故障	0.1、0.4、1	-0.1、-0.4、-1	0.4、0.6、-0.4、-0.6	0.4、0.6、-0.4、-0.6
区内故障	0.2、0.5、1	-0.2、-0.5、-1	0.4、0.6、-0.4、-0.6	0.4、0.6、-0.4、-0.6
失磁	0.1、0.4、1	-0.1、-0.4、-1	0.4、0.6、-0.4、-0.6	0.4、0.6、-0.4、-0.6
低电压	无	-0.4、-1	0.4、0.6	-0.4、-0.6

### 4.2 定值整定

失磁保护定值如表 3 所示。

表 3 失磁保护定值

Table 3 Setting value of loss of excitation protection

定值名称/ $\Omega$	整定值
静稳动作阻抗 $Z_{1A}/\Omega$	14.85
静稳动作阻抗 $Z_{1B}/\Omega$	68.04
异步动作阻抗 $Z_{2A}/\Omega$	10.7
异步动作阻抗 $Z_{2B}/\Omega$	68.04
机端低电压/V	80
励磁低电压/V	40.0
下抛阻抗 $Z_k/\Omega$	50.7
下抛阻抗 $Z_p/\Omega$	118.04

### 4.3 仿真分析

1) 发电工况: 模拟机组全失磁, 失磁后机端电流、有功功率、无功功率的典型仿真波形见图 4, 与理论分析一致。

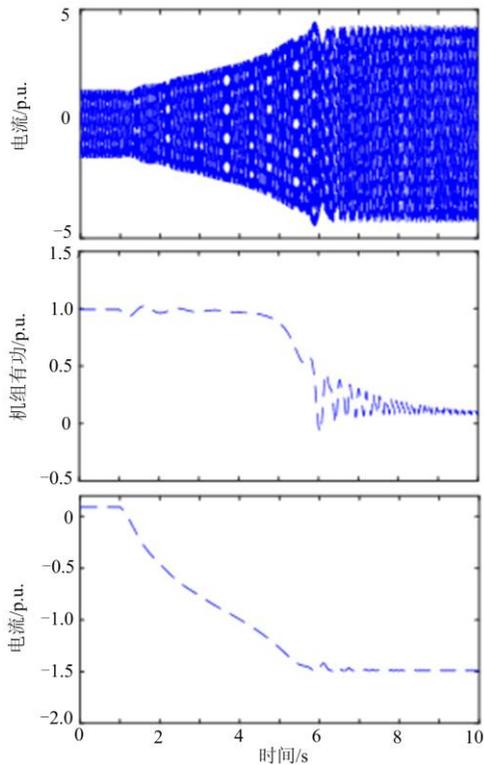


图 4 发电工况机组全失磁仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform of total loss of excitation for generating condition

2) 模拟抽水调相工况：过励全失磁典型仿真波形见图 5，欠励全失磁典型仿真波形见图 6，从图中能看出这两种全失磁，机组无功有突变，但过励时才有方向变化，机组 2.8 s 以后进入异步稳定运行。

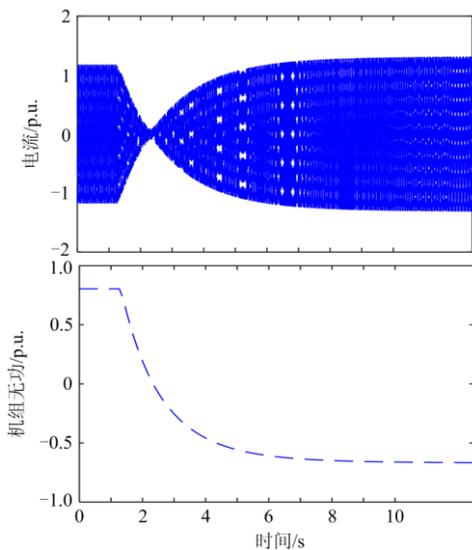


图 5 抽水调相过励全失磁仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of total loss of excitation for pumping and phase modulation overexcitation

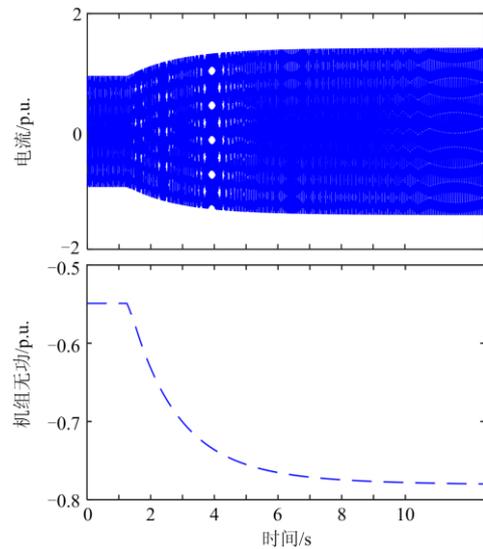


图 6 抽水调相欠励全失磁仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of total loss of excitation for pumping and phase modulation underexcitation

图 7 是瞬时性故障、失磁后的机端阻抗变化轨迹，由图 7 可知：1) 抽水调相过励，正常运行时，机端测量阻抗稳定在  $129 \angle 92^\circ \Omega$  附近；变压器高压侧区外故障时，机端测量阻抗突变，顺时针方向逼近静稳圆；2) 发电工况(抽水工况)，在机组满功率失磁时，励磁电压迅速降为 0 V，机端电压缓慢下降，机端电流缓慢上升，机端测量阻抗随时间从第四象限远端依次进到静稳极限圆、异步边界圆，并停留在异步圆内；3) 抽水调相工况，欠励失磁时，励磁电压迅速降为 0 V，机端电压缓慢下降，机端电流

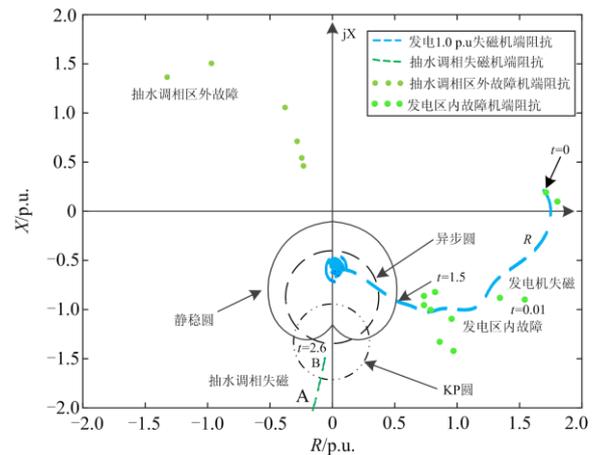


图 7 瞬时性故障、失磁后机端阻抗轨迹图

Fig. 7 Terminal track diagram after instantaneous fault and loss of excitation

缓慢上升，机端测量阻抗随时间从第三象限远端 A 点  $137 \angle -98^\circ \Omega$  往静稳极限圆、异步边界圆方向移动，但还没到静稳极限圆就停在第三象限 B 点  $86 \angle -96^\circ \Omega$  附近。

综上所述：1) 失磁保护若采用逆无功主判据，抽水调相过励失磁后，无功方向从发出感性无功向吸收感性无功突变，失磁保护可以正确动作。抽水调相欠励失磁时，一直为吸收感性无功，保护装置长期启动，易导致其他保护误动。2) 失磁保护若采用静稳极限圆或异步边界圆主判据，在故障情况下，失磁保护不会误动。在发电(抽水)失磁时，失磁保护能正确动作。在抽水调相时，失磁保护拒动。

#### 4.4 下抛阻抗圆(KP 圆)判据

从上节分析可知，机组调相失磁将进入异步稳定运行，故本文建议采用下抛阻抗圆(KP 圆)判据。

设  $X_d$  为抽蓄机组同步电抗标么值， $U_N$  为机组额定电压， $S_N$  为额定视在功率， $n_a$  为电流互感器变比， $n_v$  为电压互感器变比，测试下抛阻抗圆上、下边界电抗定值  $X_{k.set}$  和  $X_{p.set}$  分别为

$$X_{k.set} = -0.7X_d \frac{U_N^2 n_a}{S_N n_v} \quad (1)$$

$$X_{p.set} = -1.5X_d \frac{U_N^2 n_a}{S_N n_v} \quad (2)$$

**KP 圆判据:** 当机端阻抗  $Z_{zd}$  进入下抛阻抗圆时，判定满足失磁判据。下抛阻抗圆圆心坐标整定值为  $(0, -j(X_{k.set} + X_{p.set})/2)$ ，半径整定值为  $R_{set} = (X_{p.set} - X_{k.set})/2$ 。当在抽水调相工况下失磁时，机端测量阻抗进入动作区，失磁保护正确动作。实际工程下抛阻抗圆上、下边界电抗定值  $X_{k.set}$  和  $X_{p.set}$  可采用神经网络方法进行优化<sup>[24-32]</sup>。

改进的发电(抽水)失磁逻辑框图如 8 所示。

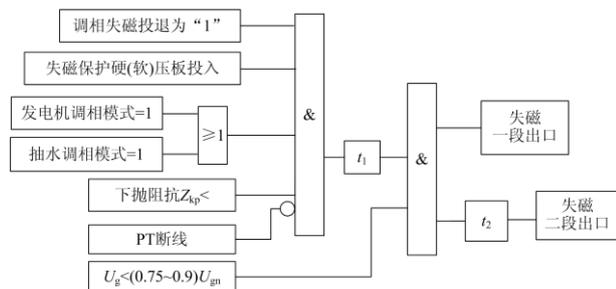


图 8 调相失磁保护逻辑框图

Fig. 8 Logic diagram of phase modulation loss of excitation protection

图 9 为失磁保护配合流程图。根据调相模式开入区分运行工况，在发电(抽水)工况采用现有的阻抗判据，在抽水(发电)调相工况采用下抛阻抗圆判据，从而实现机组全工况无死区的失磁保护。

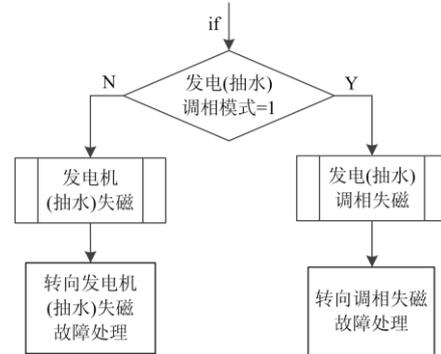


图 9 失磁保护流程图

Fig. 9 Flow chart of excitation loss protection

## 5 结论

本文在研究抽蓄机组保护原理的基础上，搭建了抽蓄机组-无穷大系统 RTDS 模型，并进行了闭环仿真测试。由仿真结果可知，在发电、抽水调相工况欠励运行时，现有失磁保护的逆无功判据会导致保护装置长期启动，其他保护易误动。在抽水调相工况全失磁时，静稳极限阻抗圆、异步边界阻抗圆判据失效。因此，提出了 KP 阻抗圆判据，可实现抽蓄机组各种工况、各种负荷水平的全面无死区失磁保护。

本文参照试验结果初步给出了 KP 阻抗圆的工程定值，后续将采用神经网络模型优化定值。

## 参考文献

- [1] 张晓华, 魏子睿, 马煜, 等. 经柔直电网互联的含抽蓄的联合发电系统最大供电量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 134-142.  
ZHANG Xiaohua, WEI Zirui, MA Yu, et al. Maximum power supply calculation of combined power generation with pumped storage system interconnected by VSC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 134-142.
- [2] 卢艺, 卢苑, 梁俊文, 等. 含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 39-47.  
LU Yi, LU Yuan, LIANG Junwen, et al. Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 39-47.

- Control, 2019, 47(3): 39-47.
- [3] ALVAREZ G E. Operation of pumped storage hydropower plants through optimization for power systems[J]. Energy, 2020, 202.
- [4] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [5] FENG Chen, LI Chaoshun, CHANG Li, et al. Advantage analysis of variable-speed pumped storage units in renewable energy power grid: Mechanism of avoiding S-shaped region[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 120.
- [6] 桂林, 刘正国, 孙宇光, 等. 大型抽水蓄能机组主保护优化设计研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(5): 63-65. GUI Lin, LIU Zhengguo, SUN Yuguang, et al. Optimum design of main protection for large pumped storage units[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(5): 63-65.
- [7] 刘军. 深圳蓄能水电厂机组保护配置、闭锁逻辑及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. LIU Jun. Study on unit protection configuration, blocking logic and its optimization of Shenzhen pumped storage power station[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [8] 董洋, 李相颀, 王启媛. 抽水蓄能电站发电机继电保护配置及功能分析[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(6): 36-38. DONG Yang, LI Xiangjie, WANG Qiyuan. Analysis on relay protection configuration of generator in pumped-storage power station[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(6): 36-38.
- [9] 丁焯楠, 孙育哲. 保护与励磁对发电电动机运行的限制[J]. 水电站机电技术, 2019, 42(11): 10-11, 24.
- [10] 张利. 抽水蓄能机组在不同工况下保护闭锁逻辑策略[J]. 电工技术, 2019(16): 80-83. ZHANG Li. Protection blocking logic strategies of pumped storage units under different working conditions[J]. Electrical Engineering Technology, 2019(16): 80-83.
- [11] 冯复生. 大型汽轮发电机近年来事故原因及防范对策[J]. 电网技术, 1999, 23(1): 74-78. FENG Fusheng. Reasons of failures and accidents occurred in the stators of 300 MW turbogenerators in recent years and countermeasures[J]. Power System Technology, 1999, 23(1): 74-78.
- [12] 毛国光. 我国大型汽轮发电机的事故及存在的质量问题[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 1-7. MAO Guoguang. Reasons of failures occurred in large capacity turbogenerators in China[J]. Power System Technology, 2000, 24(11): 1-7.
- [13] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [14] 薛磊, 陈远志, 寇水潮, 等. 660 MW 汽轮发电机失磁后稳态异步运行过程分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 181-187. XUE Lei, CHEN Yuanzhi, KOU Shuichao, et al. Analysis of stable asynchronous running of 660 MW turbine generator for loss of excitation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 181-187.
- [15] NANDKEOLYAR S. Improvement of loss of excitation protection of an alternator in the presence of shunt-FACTS —— a comprehensive review[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 114.
- [16] 鹿伟, 王增平, 郑涛, 等. 基于振荡边界圆的失磁保护新判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 7-12. LU Wei, WANG Zengping, ZHENG Tao, et al. Research on a novel loss of excitation protection criterion based on impedance circle of oscillatory boundary[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 7-12.
- [17] 徐业荣, 包明磊, 李玉平, 等. 大型汽轮发电机失磁保护定值整定探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 154-159. XU Yerong, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Discussion on setting calculation of large steam turbine generator loss-of-excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 154-159.
- [18] 刘春晖, 钱文晓, 杨朋威, 等. 新一代 300 Mvar 调相机失磁运行特性及保护研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 154-159. LIU Chunhui, QIAN Wenxiao, YANG Pengwei, et al. Loss-of-excitation operation of new generation 300 Mvar synchronous condenser and its relay protection[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 154-159.
- [19] 吴跨宇, 卢岑岑, 袁亚洲. 抽蓄机组调相运行对宾金直流无功电压支撑的仿真研究[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 54-60. WU Kuayu, LU Cencen, YUAN Yazhou. Simulation analysis of voltage support to Binjin HVDC provided by pumped storage unit's synchronous condenser operation[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 54-60.
- [20] 郑柏青. 关于桐柏 1 号机组失磁保护动作浅析[J]. 水电站机电技术, 2012, 35(4): 115-116.

- [21] WFB-801A-SP 大型抽水蓄能机组发电电动机保护装置技术及使用说明书[S]. 2019.
- [22] 颜湘武, 吕佳伟, 王保珂, 等. 适用于电动汽车快充的虚拟同步电动机技术研究[J]. 新能源汽车供能技术, 2019, 3(2): 6-11.  
YAN Xiangwu, LÜ Jiawei, WANG Yuke, et al. Research on virtual synchronous motor technology for electric vehicle fast charging[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2019, 3(2): 6-11.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 抽水蓄能发电电动机变压器组继电保护配置导则: GB/T 32898[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.  
China National Standardization Management Committee. Configuration guide of relay protection for pump-storage generator and transformer unit: GB/T 32898[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [24] 王黎明, 李旭, 曹彬, 等. 基于 BP 神经网络的线路绝缘子表面泄漏电流预测[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 69-76.  
WANG Liming, LI Xu, CAO Bin, et al. Prediction of leakage current on insulator surface of transmission line based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 69-76.
- [25] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.  
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [26] 邹浩, 窦震海, 张博, 等. 基于提升小波和改进 PSO-Elman 神经网络的短期负荷预测[J]. 电测与仪表, 2020, 57(21): 119-125.  
ZOU Hao, DOU Zhanhai, ZHANG Bo, et al. Short-term load forecasting based on lifting wavelet and improved PSO-Elman neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(21): 119-125.
- [27] 魏华栋, 陶媛, 蔡昌春, 等. 基于改进长短期记忆神经网络的短期负荷预测[J]. 电测与仪表, 2020, 57(19): 93-98.  
WEI Huadong, TAO Yuan, CAI Changchun, et al. Short-term load forecasting based on improved long short-term memory neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(19): 93-98.
- [28] 傅晨钊, 司文荣, 徐鹏, 等. 基于 RBF 神经网络的变压器绕组及铁心振动信号分离研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 159-164.  
FU Chenzhao, SI Wenrong, XU Peng, et al. Research on vibration signal separation of transformer winding and core based on RBF neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 159-164.
- [29] 林琳, 陈志英. 基于模糊 RBF 神经网络的高压断路器机构故障诊断[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 52-58.  
LIN Lin, CHEN Zhiying. Fault diagnosis of operating mechanism of high-voltage circuit breaker based on fuzzy rbf neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 52-58.
- [30] 余长厅, 黎大健, 汲胜昌, 等. 基于振动噪声及 BP 神经网络的变压器故障诊断方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 256-261.  
YU Changting, LI Dajian, JI Shengchang, et al. Research on transformer fault diagnosis method based on vibration noise and BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 256-261.
- [31] 杨芳君, 王耀力, 王力波, 等. 基于改进 CS 算法优化 ElmanIOC 神经网络的短期负荷预测[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 32-37.  
YANG Fangjun, WANG Yaoli, WANG Libo, et al. Short-term load forecasting based on optimized Elman-IOC neural network with improved CS algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 32-37.
- [32] 王克杰, 张瑞. 基于改进 BP 神经网络的短期电力负荷预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 115-121.  
WANG Kejie, ZHANG Rui. Research on short term power load forecasting method based on improved BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 115-121.

收稿日期: 2020-06-23; 修回日期: 2020-11-15

作者简介:

贾德峰(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 现从事电力系统仿真试验研究工作; E-mail: jiadefeng@ketop.cn

王明东(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统分析与控制、电力系统规划方面的教学和科研工作。E-mail: wangmingdong@zzu.edu.cn

(编辑 姜新丽)