

# 大型水轮发电机失磁保护与低励限制配合问题的探讨

李 晖<sup>1</sup>, 鲁功强<sup>2</sup>, 王育学<sup>2</sup>, 洪 心<sup>1</sup>, 邹 健<sup>1</sup>, 封孝松<sup>3</sup>

(1. 中国长江电力股份有限公司三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 四川 成都 610041; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 溪洛渡水力发电厂, 云南 昭通 657300)

**摘要:** 有关整定导则要求“失磁阻抗判据应校核不抢先于励磁低励限制动作”, 但工程上失磁保护与励磁低励限制的整定是分开进行的, 并且在不同的坐标系中描述, 容易造成二者动作失去配合。针对大型水轮发电机常用的失磁保护定子侧静稳阻抗判据, 结合具体保护装置实现方法, 论述了其和低励限制动作区如何进行比较的计算方法, 探讨了失磁保护与低励限制的动作配合关系。并在最后讨论了改善低励限制与失磁保护定子侧阻抗判据配合的方案。

**关键词:** 大型水轮发电机; 失磁保护; 静稳边界; 低励限制; 阻抗判据

## Discussion on coordination between loss of excitation protection and under excitation limit control for large hydro-generator

LI Hui<sup>1</sup>, LU Gong-qiang<sup>2</sup>, WANG Yu-xue<sup>2</sup>, HONG Xin<sup>1</sup>, ZOU Jian<sup>1</sup>, FENG Xiao-song<sup>3</sup>

(1. Three Gorges Project Cascade Dispatching Communication Centre, China Yangtze Power Co., Ltd, Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. Xiluodu Hydraulic Power Station, Zhaotong 657300, China)

**Abstract:** According to related setting calculation guide, the impedance criterion of loss of excitation (LOE) protection should be verified to make sure LOE protection operates before under excitation limit (UEL) control. However, the setting values of LOE and UEL are calculated separately, and their operation characteristics are defined in different coordinate systems, leading to the mismatch of each other easily. Considering the steady state stability impedance criterion commonly used for large hydro-generators LOE protection, this paper presents an algorithm of comparing the operation zone of LOE and UEL with the concern of specific protection device. Furthermore, the paper investigates the coordination relationship between LOE protection and UEL control. At last, several schemes are given on better cooperation of UEL with LOE impedance criterion on stator side.

**Key words:** large hydro-generator; loss of excitation (LOE) protection; steady state stability boundary; under excitation limiter (UEL); impedance criterion

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0068-05

## 0 引言

大型水轮发电机在运行中可能出现励磁水平偏低的情况, 如电网在负荷低谷期电压可能偏高, 此时常采取发电机降低励磁进相运行的调压措施; 当系统因扰动或故障使得电压突然升高时, 自动电压调节器(Automatic voltage regulator, AVR)会自动响应降低励磁<sup>[1]</sup>。

当机组励磁水平低于允许值时, 发电机励磁系统中的低励限制功能发挥作用, 发出控制信号以增大励磁输出, 使机组运行点回到允许范围。而在发电机励磁电流过低甚至是低励失磁故障下, 失磁保

护也会动作。大型水轮发电机一般采用定子侧阻抗判据作为失磁保护主判据, 按照《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》<sup>[2]</sup>要求, “失磁阻抗判据应校核不抢先于励磁低励限制动作”。然而在实际整定时失磁保护与励磁低励限制是分开进行的, 并且整定考虑的问题和原则不同, 因此需分析探讨二者之间的配合关系。

大型水轮发电机组由于单机容量大, 且远离负荷中心, 失磁保护定子侧阻抗判据一般采用静稳边界圆特性。本文以国内某大型水电厂两台 700 MW 机组实际配置的低励限制动作方程及失磁保护静稳边界整定结果为例, 给出了失磁保护中定子侧阻抗

判据与低励限制曲线动作区比较的分析计算方法, 探讨了二者之间的动作配合关系, 并给出了低励限制与失磁保护阻抗判据配合的两种方案。

## 1 低励限制曲线在阻抗平面上的映射

该电厂机组低励限制曲线如图 1 所示。图中有功无功值为发电机机端测量值, 且均标么在发电机有功额定值(700 MW)下。

失磁保护的方程一般在阻抗平面上描述, 而低励限制的动作方程一般在功率平面上描述, 为直观比较, 需要将二者统一到同一个坐标平面中<sup>[3]</sup>。考虑到两台机组的低励限制曲线相同, 因此将其转换到阻抗平面与失磁保护动作区进行比较, 这样只需做一次变换, 更为简便。

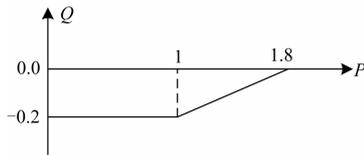


图 1 机组励磁低励限制曲线

Fig. 1 Diagram of UEL characteristics

低励限制整定曲线换算到机组额定容量(777.8 MVA)下的标么值表达式为

$$Q = -0.18 \quad 0 < P < 0.9 \quad (1)$$

$$Q = 0.25 \times (P - 1.62) \quad 0.9 < P < 1.62 \quad (2)$$

对于机端测量有功  $P$  及无功  $Q$  有

$$P = UI \cos \theta \quad (3)$$

$$Q = UI \sin \theta \quad (4)$$

其中,  $U$ 、 $I$  分别为发电机端线电压、线电流, 为标么值。

考虑到  $(U \cos \theta) / I = R$ 、 $(U \sin \theta) / I = X$  以及  $I^2 = U^2 / (R^2 + X^2)$ , 将其代入式(3)、式(4)( $R$  和  $X$  为以发电机基本阻抗  $X_b = U^2 / S$  为基准的标么值), 可得

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R^2 + X^2} R \quad (5)$$

$$Q = I^2 X = \frac{U^2}{R^2 + X^2} X \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(1)、式(2)中, 整理后得到两组映射到阻抗平面上的表达式如式(7)、式(8)。

$$\begin{cases} R^2 + (X + 2.778U^2)^2 = (2.778U^2)^2 \\ R > 0 \\ (R - 0.556U^2)^2 + X^2 > (0.556U^2)^2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} (R - 0.309U^2)^2 + (X + 1.235U^2)^2 = (1.235U^2)^2 \\ (R - 0.556U^2)^2 + X^2 < (0.556U^2)^2 \\ (R - 0.309U^2)^2 + X^2 > (0.309U^2)^2 \end{cases} \quad (8)$$

容易看出其确定的曲线为两段圆弧。由于方程中包含机端电压  $U$ , 圆弧的位置和大小均会变化。

## 2 失磁保护定子侧阻抗判据动作特性

文献[3-8]提出的低励限制与失磁保护动作区计算方法忽略了具体保护装置实现时配合静稳边界判据的定子侧辅助判据(如无功反向判据等, 后文将述及), 扩大了保护动作区, 且仅简单考虑了汽轮发电机静稳边界圆, 不适用于水轮发电机组。下面的分析将结合该厂水轮发电机组配置的失磁保护动作特性展开。

两台机组配置了不同厂家的保护, 其失磁保护阻抗判据均采用静稳边界圆阻抗判据。其中一台机组配置保护装置采用水滴圆动作特性(为叙述方便, 后文称 A 型失磁保护), 其约束方程可参见文献[9]中的推导过程, 此处不再赘述。水滴圆与纵轴的交点分别为  $X_s$ (系统联系电抗, 包括系统等值电抗及主变电抗)和  $-X_q$ (交轴同步电抗), 如图 2 所示。需要说明的是, 保护装置对水滴圆的下端点  $X_q$  做了一定处理, 即用乘以可靠系数(一般取为 1.05)后的  $X_q$  代替原  $X_q$ , 得到考虑一定裕度范围的静稳水滴圆边界。这样低励限制曲线更容易进入扩大后的保护动作区, 使得失磁保护可能先于低励限制出口。因此在考察低励限制与失磁静稳圆动作区关系时, 要比较扩大后的水滴圆与低励限制区的关系。

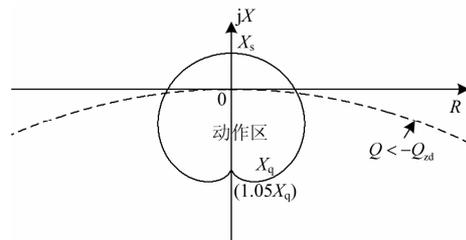


图 2 A 型失磁保护静稳边界阻抗判据动作特性

Fig. 2 Diagram of the steady state stability boundary criterion's operation characteristics of LOE protection of A type

另外, A 型失磁保护阻抗判据选择静稳边界圆时, 无功反向判据也推荐投入, 即失磁保护动作还需要满足  $Q < -Q_{zd}$ 。其目的是防止机组在非低励失磁工况下(如机组正常进相或发生外部短路故障), 机端测量阻抗轨迹进入静稳圆而发生误动。该机组的无功反向定值  $Q_{zd}$  整定为 0.1(为机组额定有功下的标么值)。依照上节的变换公式, 将其转换到阻抗

平面，并重新标么在机组额定电压和额定容量下，其动作方程为

$$R^2 + (X + 5.556U^2)^2 < (5.556U^2)^2 \quad (9)$$

上式对应的动作特性曲线为一个圆，该圆大小也和机端电压有关。故 A 型失磁保护定子侧阻抗判据动作区即为水滴圆与无功反向判据确定的圆弧所围成的区域。

另一台机组所配置失磁保护静稳边界采用标准圆特性(后文称 B 型失磁保护)，圆与纵轴的交点分别为  $X_s$ (系统联系电抗，包括系统等值电抗及主变电抗)和  $X_d$ (直轴同步电抗)，如图 3 所示。其定子侧阻抗判据动作区为阻抗圆与两条电抗线围成的区域，电抗线设置的作用与 A 型失磁保护的无功反向边界相同。同样，按照失磁保护最易与低励限制发生失配的情况考虑，取电抗线与实轴的夹角为最小值  $10^\circ$ 。

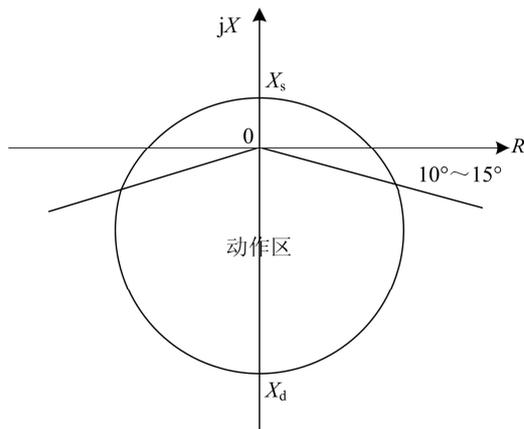


图 3 B 型失磁保护静稳边界阻抗判据动作特性

Fig.3 Diagram of the steady state stability boundary criterion's operation characteristics of LOE protection of B type

### 3 低励限制与失磁保护定子侧阻抗判据配合关系分析

依据前两小节分析，下面给出两台机组的励磁低励限制与失磁保护定子侧阻抗判据在阻抗平面上的动作区图示。其中机组的有关参数为  $X_{du}=0.88$ (不饱和值)、 $X_{qu}=0.69$ (不饱和值)、 $X_s=0.3$ (系统等值电抗与主变电抗之和)。所有计算均归算到发电机额定电压(20 kV)、额定容量(777.8 MVA)下以标么值进行。

图 4、图 5 为装设 A 型失磁保护机组的低励限制与失磁保护动作区，图 6 为装设 B 型失磁保护机组的低励限制与失磁保护动作区，各曲线代表的含义都在图中给出了标注，阴影部分为失磁保护动作

区。如前述，对于配置 A 型保护的机组，需要比较扩大后的失磁保护动作区与低励限制曲线的关系，以观察失磁保护最容易先于低励限制动作的情况，因此图 4、图 5 中都做出了理论水滴圆边界和考虑一定可靠系数后的水滴圆边界。此外，机端电压的变化会引起低励限制边界和无功反向边界的改变<sup>[3,6]</sup>，有必要考察不同机端电压对低励限制与失磁保护动作先后情况的影响。图 4~图 6 给出了两种机端电压条件下的动作区，包括机端电压为额定值以及机端电压为 0.9 倍额定值(正常运行时机端最低允许电压)。

可以看到，两台机组在发电机机端电压为额定及正常最低允许电压下，低励限制曲线都不同程度地进入到了静稳圆动作范围内，只是由于无功反向边界(A 型失磁保护)或是两条电抗线(B 型失磁保护)削去了静稳边界圆上半部分的原因，才得以保持在失磁保护动作区之外。因此，在不计保护转子侧判据、系统(或机端)三相低电压判据及其与定子侧阻抗判据逻辑组合的情况下，随机组进相运行程度加深，机端测量阻抗将先进入低励限制区，然后过渡到失磁保护静稳圆内，励磁低励限制能先于失磁保护动作。

另需指出，尽管低励限制曲线在第一象限没有全部包住保护动作区，但未包住的部分对应于机组有功负载很大的情况( $P > 1.8$ )，反映在阻抗平面上即为测量阻抗电阻成分很小，靠近虚轴。由于发电机很难运行在这样严重的过载工况下，低励限制曲线没有在  $P > 1.8$  时定义。此时也无需考虑与失磁保护的配合。

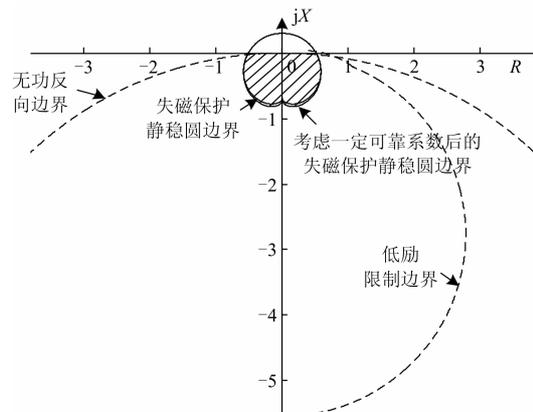


图 4 配置 A 型失磁保护机组低励限制与失磁保护动作区关系(机端电压  $U_g=U_n$ )

Fig. 4 Operation zone comparison between UEL and LOE protection of the unit equipped with A type LOE protection (generator voltage  $U_g=U_n$ )

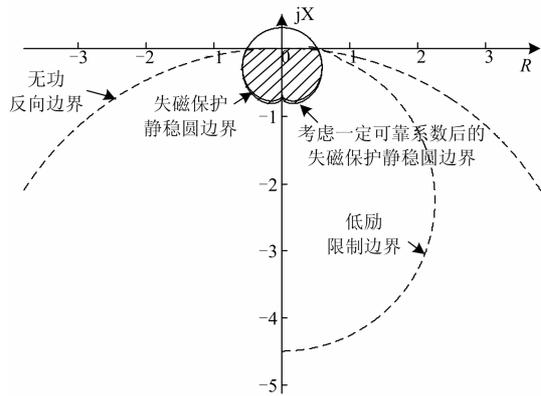


图 5 配置 A 型失磁保护机组低励限制与失磁保护动作区关系(机端电压  $U_g=0.9U_n$ )

Fig. 5 Operation zone comparison between UEL and LOE protection of the unit equipped with A type LOE protection (generator voltage  $U_g=0.9U_n$ )

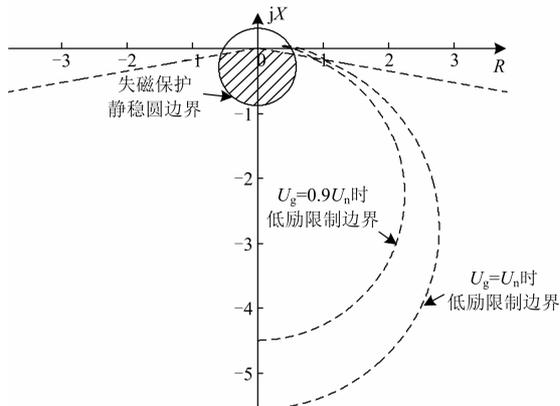


图 6 配置 B 型失磁保护机组低励限制与失磁保护动作区关系(机端电压  $U_g=U_n, 0.9U_n$ )

Fig. 6 Operation zone comparison between UEL and LOE protection of the unit equipped with B type LOE protection (generator voltage  $U_g=U_n, 0.9U_n$ )

上面的分析结果只是一个失磁保护与励磁低励限制正好配合上的例子,事实上二者是分开整定的,并且整定时考虑的问题不同,相互之间不容易形成配合。失磁保护定子侧静稳阻抗判据只从系统稳定角度出发,保证励磁电流不至于低到维持机组与系统静稳安全的极限,尤其对于作为系统重要电源的大型水轮发电机组,静稳破坏事故的后果将非常严重。而励磁低励限制更多地要从机组安全角度出发。例如当发电机进相运行时,电枢反应将逐渐从去磁作用转变为助磁作用,定子铁芯中的磁通密度将会明显增加,特别是端部铁芯部分,引起比其它部位更为显著的温升<sup>[1,10]</sup>。又如,维持机组有功输出不变,随其进相深度增加,发电机从系统吸收的无功电流增加,总的定子电流也增加,在机端电

压下降的情况下,这种情形将更加危险。因此端部发热和定子过流以及其他限制因素等等都是低励限制参数设置时要考量的方面,其整定原则是复杂的,并且与失磁保护整定相互独立。

从尽量避免切机以保证系统电源供应的角度,低励限制先于失磁保护动作确是有利的,以赶在机组失去静稳而被保护跳闸之前,确保由励磁系统尽可能重新提高励磁水平,促使机组回到正常运行范围。而失磁保护作为故障下励磁控制调节之后保证发电机和电网安全的最后防线,其阻抗判据按照静态稳定边界整定的原则不应该动摇。把握好这一点,当出现失磁保护(仅考虑保护定子侧阻抗判据)与低励限制动作区交叉失配时,欲改善二者的配合,可以有这样两种途径。

(1) 不更改失磁保护静稳阻抗判据的特性和定值,校核励磁低励限制区,确保低励限制曲线在静稳边界圆外(转换到阻抗平面)。若不满足则需抬高低励限制定值,以限制机组进相深度;或改变低励限制特性,如改用模拟静稳圆型或多折线型曲线<sup>[3,7]</sup>,以获得与失磁保护静稳边界更好的匹配。

低励限制曲线定值的具体调整可以参考前两小节失磁保护阻抗判据与低励限制动作区的校核计算方法,整定时需要结合具体的失磁保护判据实现,并考虑一定的配合裕度。

有文献提出可以在失磁保护中增加一个进相深度预警段的方法<sup>[7,11]</sup>。其思路是根据机组当前有功功率和机端电压计算出此时静态稳定的无功边界值,当进相无功功率接近静态稳定无功边界值时,及时动作于报警,提醒电厂人员调整运行方式,避免因进相过深导致失磁保护动作停机。这种方法相当于是低励限制的补充,也可以间接达到低励限制与失磁保护配合的目的。

(2) 将定子端部发热等低励限制考虑的问题也放到失磁保护中处理。例如可将计入端部发热等机组安全因素后的运行容量曲线映射到阻抗平面上,与静稳安全边界一起,通过定子阻抗判据实现保障。而低励限制曲线也考虑静稳边界、端部发热等问题,只是在整定时均计及一定裕度。这样失磁保护与低励限制都考虑的是相同的整定原则,且由于低励限制取值更保守,保证了与失磁保护动作区之间的过渡范围;而失磁保护的定值基于系统和机组安全的极限状态,一旦进入动作区,必须启动跳闸保证安全。

#### 4 结论

失磁保护与低励限制分别从不同角度保护机组及系统安全,其整定考虑的问题不同。失磁保护

主要考虑保证机组与系统的静态稳定, 而低励限制则还要考虑诸如端部发热、定子过流等机组安全问题。而且在工程实际中二者完全分开整定, 不容易形成配合。

对于作为系统重要电源的大型水轮发电机组, 低励限制先于失磁保护动作具有优势, 以保证机组尽可能不被切除。针对大型水轮发电机组的普遍情况, 文章给出了在同一坐标平面内比较低励限制与失磁保护定子侧静稳阻抗判据动作区的方法, 并在最后讨论了低励限制与失磁保护阻抗判据配合的方案, 即改变低励限制定值或特性曲线, 以及将低励限制的考虑因素都放在失磁保护中处理。在考虑失磁保护阻抗判据与三相低电压判据及转子判据逻辑组合的情况下, 其与低励限制的动作配合方法还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] 王青, 刘肇旭, 孙华东, 等. 发电机低励限制功能的设置原则[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 55-60.  
WANG Qing, LIU Zhao-xu, SUN Hua-dong, et al. General principle of generator under excitation limiter settings[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 55-60.
- [2] 国家能源局. DL/T 684-2012 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 19.  
National Energy Administration. DL/T 684-2012 large generator and transformer relaying protection setting calculation guide[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 19.
- [3] 刘伟良, 荀吉辉, 薛玮. 发电机失磁保护与低励限制的整定配合[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 77-80.  
LIU Wei-liang, XUN Ji-hui, XUE Wei. Matching setting of loss-of-excitation protection and low exciting limit for generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 77-80.
- [4] 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 Quan-rong. Discussion on large non-salient pole generator phase-advancement operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2): 94-97.
- [5] 郭春平, 余振, 殷修涛. 发电机低励限制与失磁保护的配合整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 129-132, 9.  
GUO Chun-ping, YU Zhen, YIN Xiu-tao. Coordination setting calculation of minimum-excitation limit and loss-of-excitation protection for generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 129-132, 9.
- [6] 郝雪平. 低励限制与失磁保护配合的分析[J]. 华北电力技术, 2005(7): 15-17.  
HAO Xue-ping. Analysis on coordination of minimum excitation limit and loss-of-field protection[J]. North China Electric Power, 2005(7): 15-17.
- [7] 李中玉, 孙胜洪, 王睿. 并网发电机组网源协调原则的探讨[J]. 华东电力, 2013, 41(3): 673-675.  
LI Zhong-yu, SUN Sheng-hong, WANG Rui. Discussion on the principle of the coordination of power system with generator[J]. East China Electric Power, 2013, 41(3): 673-675.
- [8] 刘一丹, 张小易, 崔晓祥. 火电厂发电机失磁保护阻抗判据的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 235-240.  
LIU Yi-dan, ZHANG Xiao-yi, CUI Xiao-xiang. Discussion of thermal power plant generator resistance criterion for loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 235-240.
- [9] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2002: 298-300.  
WANG Wei-jian. Theory and application of electric main equipments relaying protection[M]. Second Edition. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 298-300.
- [10] 韦延方, 卫志农, 张友强, 等. 发电机进相运行的研究现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 146-154.  
WEI Yan-fang, WEI Zhi-nong, ZHANG You-qiang, et al. Progress and development trend on leading phase of generator[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 146-154.
- [11] 周强, 易先举, 汪祖禄. 三峡左岸电站发电机-变压器组保护技术方案[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(11): 22-25, 60.  
ZHOU Qiang, YI Xian-ju, WANG Zu-lu. Technical scheme of generator-transformer relay protection system for Three Gorges left bank power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(11): 22-25, 60.

收稿日期: 2013-11-01; 修回日期: 2014-01-06

作者简介:

李 晖(1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事流域梯级水电联合调度和水电站运行等技术管理方面的工作和研究; E-mail: li\_hui@ctgpc.com.cn

鲁功强(1990-), 男, 通讯作者, 硕士研究生, 主要研究大型发电机继电保护技术; E-mail: lugongqiang\_ceed@163.com

王育学(1988-), 男, 博士研究生, 主要研究大型发电机继电保护技术。