

# UNITROL5000 励磁系统低励限制优化整定方法研究

解兵<sup>1</sup>, 徐珂<sup>1</sup>, 罗凯明<sup>2</sup>, 刘建坤<sup>1</sup>, 周前<sup>1</sup>

(1. 国网海上风电并网联合实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103; 2. 国网江苏省电力有限公司调度控制中心, 江苏 南京 210024)

**摘要:**发电机进相运行时,出现 UNITROL5000 励磁系统低励限制的动作值与整定值不一致的情况,导致机组无法发挥其进相能力,造成运行电压过高,不利于电网安全运行。文中分析两种类型励磁系统低励限制动作特性及影响因素,根据动作特性提出优化的整定方法,并通过实例验证该整定方法的可行性。该整定方法综合考虑机组的进相能力及失磁保护情况,整定定值后机组低励限制动作值接近机组进相能力曲线,并与失磁保护配合合理,为工程实际中 UNITROL5000 励磁系统低励限制定值整定提供了参考。

**关键词:**UNITROL5000 励磁系统; 低励限制; 整定方法; 进相能力; 失磁保护

中图分类号:TM31

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0149-06

## 0 引言

低励限制是励磁调节器的一项重要功能,其目的是避免无功功率降低过多引起失步<sup>[1-4]</sup>。早期,低励限制是根据机组的静稳极限、端部热稳定、机端电压及失磁保护定值情况进行整定<sup>[5-6]</sup>,文献[7]则要求低励限制定值在机组进相能力范围内整定,确保机组达到进相能力之前低励限制动作,限制机组进一步进相。此外,近年来电网在低负荷期间的无功形势越来越严峻,需要机组尽可能发挥进相能力<sup>[8-10]</sup>。因此,低励限制整定应在机组进相能力曲线之上,且尽可能接近机组进相能力曲线,满足电网对机组进相的需求。

在低励限制功能验证试验时发现,ABB UNITROL5000 型励磁系统低励限制的动作值和整定值有较大偏差,且偏差情况随着机组工况变化而变化。目前,我国 600 MW 及以上容量的发电机组大多采用该励磁系统,有必要针对该型励磁调节器低励限制动作特性开展研究,合理整定定值。

文中针对 UNITROL5000 励磁系统两种不同软件版本励磁调节器开展低励限制动作特性研究,在此基础上提出动作值接近进相能力为目标的低励限制整定方法,并通过失磁保护校核,使得低励限制实际动作值与实际进相能力接近,且与失磁保护配合合理。

## 1 UNITROL5000 低励限制动作特性

UNITROL5000 励磁系统低励限制动作特性有

收稿日期:2018-03-23;修回日期:2018-05-07

基金项目:国家电网有限公司科技项目(521001160005)

两种类型,一种是软件版本较老的励磁调节器,该励磁调节器低励限制动作后,无功有一个明显上抬过程;另一种是软件升级后的励磁调节器,该励磁调节器低励限制动作后,无功保持平稳。为便于描述,文中将第一种类型的励磁调节器简称为 A 型励磁调节器,第二种软件版本较新励磁调节器简称为 B 型励磁调节器。

经研究发现,不同工况下励磁调节器低励限制动作时比例积分微分控制器(proportion integral derivative, PID)输出基本一致。其中 A 型励磁调节器的 PID 输出随着无功降低呈上升趋势,当 PID 输出上升至 1.4%后,低励限制动作,并将无功上抬,同时 PID 输出下降并稳定在 0.4%附近;B 型励磁调节器低励限制动作时无功保持稳定, PID 输出值上升至 0.4%,并保持稳定。

A 型励磁调节器的低励限制环节的 PID 控制原理如图 1 所示。

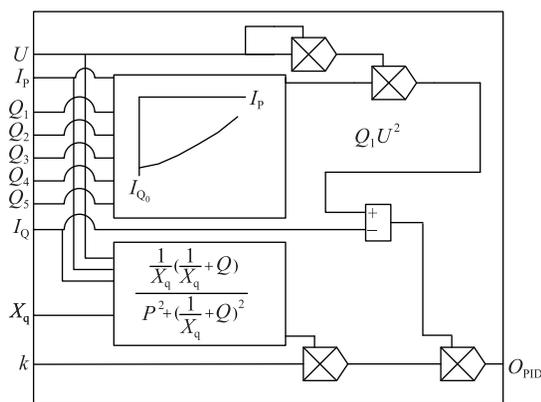


图 1 A 型低励限制 PID 控制原理

Fig.1 The control principle of type A excitation regulator's proportion integral derivative

图中： $Q_1—Q_5$ 为低励限制的整定值； $Q_0$ 为当前有功对应的低励限制定值； $U$ 为当前运行电压； $I_Q$ 为当前无功电流分量； $I_P$ 为当前有功电流分量； $X_q$ 为交轴同步电抗； $k$ 为低励限制器增益； $O_{PID}$ 为低励限制PID输出值，由图1的控制原理推导出式(1)：

$$O_{PID} = k \frac{(U^2 Q_0 - I_Q)(1 + Q X_q)}{(X_q P)^2 + (1 + X_q Q)^2} \quad (1)$$

从式(1)看， $X_q$ 是固定的值， $I_Q$ 与无功  $Q$ 、电压  $U$  相关，因此PID输出值  $O_{PID}$  只与  $U, P, Q$  以及  $k$  4个影响因素相关。为进一步了解单个影响因素对  $O_{PID}$  的影响，文中以某台百万千瓦机组为例开展分析，该机组参数如下： $S_N = 1167 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ， $U_N = 27 \text{ kV}$ ， $X_q = 2.74 \text{ p.u.}$ 。先针对4个影响因素其中3个设定初始值，只改变1个定值，计算  $O_{PID}$  分别为1.4%和0.4%时对应的无功数值  $Q$ ，分别记作动作时无功和上抬后无功，并画出曲线图。其中影响因素  $Q_0$  改变时，为明确反映无功动作值和定值的偏差情况，将此时的横坐标改为无功偏差，即  $Q - Q_0$ 。文中设定的4个影响因素的初始设定值分别为： $U = 26 \text{ kV}$ ， $k = 1.5$ ， $P = 500 \text{ MW}$ ， $Q_0 = -100 \text{ Mvar}$ ，计算得出不同影响因子下低励限制动作的无功情况，如图2所示。其中图(a)，(b)，(c)中蓝线为动作时无功，红线为上抬后无功；图(d)中蓝线为动作时无功偏差，红线为上抬后无功偏差。

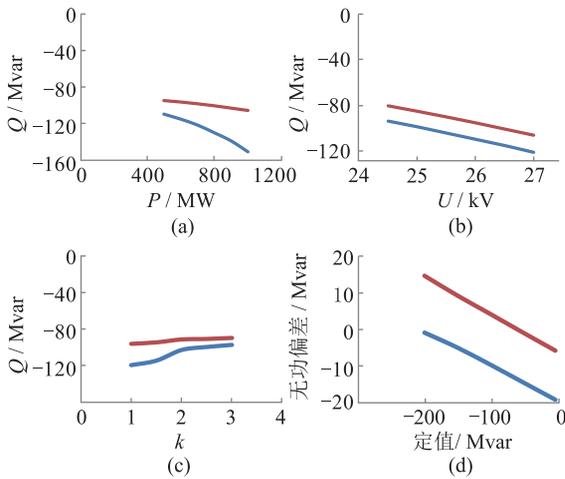


图2 不同影响因素低励限制动作时无功特性  
Fig.2 Action characteristics of low excitation limiter with different influence factors

从图2看出，随着有功增大，低励限制动作值降低，到0.9 p.u.时，无功需降至-151 Mvar 低励限制才动作，动作后无功上抬至-105.5 Mvar；随着机端电压增大、增益减小，实际低励限制动作的值却在不断降低；随着低励限制定值降低，实际低励限制动作与定值的偏差值增加，可见，低励限制定值越

低，低励限制越容易提前动作。

B型励磁调节器低励限制环节的PID控制原理如图3所示。

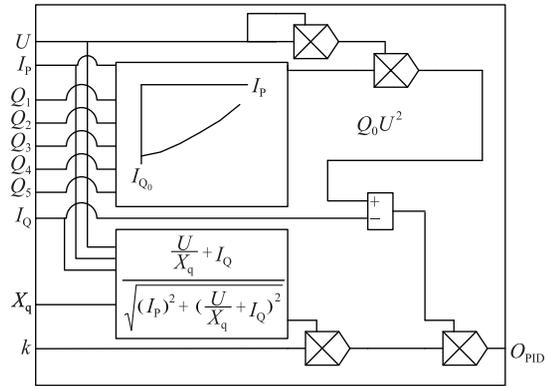


图3 B型低励限制PID控制原理

Fig.3 The control principle of type B excitation regulator's proportion integral derivative

从图3看出，A、B型低励限制器PID输出只是中间模块公式不一样，可推导出式(2)。

$$O_{PID} = k(U^2 Q_0 - I_Q) \frac{\frac{U}{X_q} + I_Q}{\sqrt{I_P^2 + (\frac{U}{X_q} + I_Q)^2}} \quad (2)$$

通过式(2)采用与A型励磁调节器同样的分析方法，可得到B型励磁调节器不同影响因素低励限制动作特性图，如图4所示。

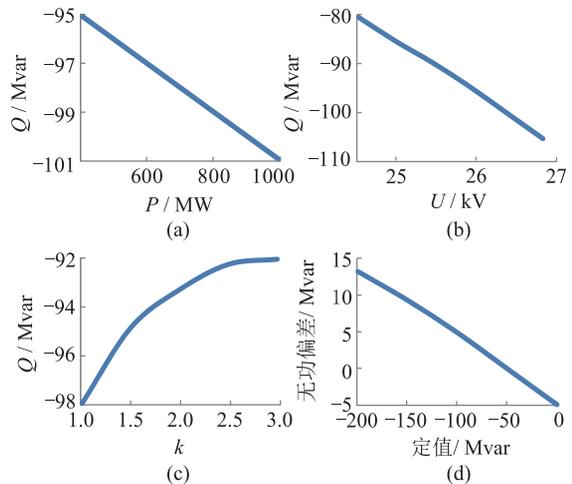


图4 不同影响因素低励限制动作时无功特性  
Fig.4 Action characteristics of low excitation limiter with different influence factors

从图4看出，低励限制动作值随着不同影响因素变化而变化，趋势跟之前版本A型励磁调节器一致，但动作值相对于A型励磁调节器提前了，接近于动作后上抬后的无功情况，而B型励磁调节器低励限制动作后，无功保持稳定。

## 2 UNITROL5000 低励限制整定方法

### 2.1 当前低励限制整定方法

根据行业标准,低励限制整定成为发电机进相试验的一部分,且要求在实测的进相能力范围内,整定低励限制曲线。UNITROL5000 低励限制定值由 5 组有功和无功组成<sup>[11-13]</sup>,所有定值采用百分比形式,以额定容量为基准。整定低励限制参数时,只能改变无功部分数值,有功部分是 0 至 1 平均分配的 5 组数据,无法修改。

一般机组开展进相试验时,有功工况分别为额定有功  $P_N$  的 50%, 75%, 100%, 而低励限制的有功定值是视在功率  $S_N$  的 0, 25%, 50%, 75% 和 100%, 与试验有功不一致,需要通过插值计算出定值。假设进相试验时,机组在额定有功的 50%, 75%, 100% 时的进相能力分别为  $Q_{50\%P}$ ,  $Q_{75\%P}$ ,  $Q_{100\%P}$ , 低励限制在视在功率的 0, 25%, 50%, 75% 和 100% 时的定值分别为  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$ 。首先根据试验工况中 75% $P_N$  和 100% $P_N$  时进相能力曲线计算 75% $S_N$  和 100% $S_N$  下无功定值,如式(3)、(4)所示。

$$Q_4 = \frac{(0.75S_N - 0.75P_N)(Q_{100\%P} - Q_{75\%P})}{P_N - 0.75P_N} + Q_{75\%P} \quad (3)$$

$$Q_5 = \frac{(S_N - 0.75P_N)(Q_{100\%P} - Q_{75\%P})}{P_N - 0.75P_N} + Q_{75\%P} \quad (4)$$

根据 75% $P_N$  和 50% $P_N$  时进相能力计算 25% $S_N$  和 50% $S_N$  下的定值,如式(5)、式(6)所示。0 时的定值设置成与 25% $S_N$  时定值一致,即:  $Q_1 = Q_2$ 。

$$Q_3 = \frac{(0.5S_N - 0.5P_N)(Q_{75\%P} - Q_{50\%P})}{0.75P_N - 0.5P_N} + Q_{50\%P} \quad (5)$$

$$Q_2 = \frac{(0.25S_N - 0.5P_N)(Q_{75\%P} - Q_{50\%P})}{0.75P_N - 0.5P_N} + Q_{50\%P} \quad (6)$$

励磁调节器有功定值无法修改,因此不可避免出现低励限制曲线与进相能力曲线不一致的地方。

### 2.2 优化的低励限制整定方法

通过当前低励限制整定方法,能保证低励限制定值组成的曲线与机组进相能力曲线尽可能接近。但励磁调节器动作值与整定值存在偏差,导致发电机组实际进相运行时,会因为低励限制提前于定值而动作,从而导致机组无法充分发挥机组进相运行能力。如春节期间,江苏电网某机组未进相至定值曲线就发生低励限制经常性动作,同时电压长期超

上限运行。由于 A 型励磁调节器低励限制动作后有一个无功上抬过程,加剧了无功波动,不利于运行控制和进相能力稳定发挥,建议针对这部分励磁调节器进行软件升级,更新为 B 型励磁调节器,使得低励限制动作后无功保持稳定。

为实现动作值跟发电机进相能力接近,应先根据发电机进相能力算出动作值,再根据动作值以及进相试验时机端电压实际值等计算出整定值。对于 UNITROL5000 励磁调节器,可根据式(3—6)算出对应 5 个有功的动作值,然后根据式(7)算出定值。

$$Q' = \frac{O_{PID} \sqrt{I_p^2 + \left(\frac{U}{X_q} + I_Q\right)^2}}{kU^2 \left(\frac{U}{X_q} + I_Q\right)} + \frac{I_Q}{U^2} \quad (7)$$

式中,  $I_p$  和  $I_Q$  可通过对应的  $P$  和  $Q$  除以  $U$  获得。

### 2.3 低励限制与失磁保护的配合

一般情况下,开展进相试验时已经针对进相试验的方案工况进行失磁保护校核,试验时获得的机组进相能力已经事实证明不会引起失磁保护动作。由于低励限制曲线整定后使得动作值与机组进相能力接近,因此可认为,低励限制曲线在试验有功工况范围内满足与失磁保护配合的要求。然而,低励限制整定的有功区间为  $[0, S_N]$ , 而进相试验时有功区间为  $[50\%P_N, 100\%P_N]$ , 低励限制整定的范围要大于试验范围,为确保整条低励限制曲线与失磁保护相配合,仍需开展失磁保护校核工作,尤其需要关注 0 和 25% $S_N$  时的校核情况。

对于隐极机,发变组的失磁保护的定值一般由 2 个定值组成,在电阻-电抗平面 ( $R-X$  平面) 上体现为一个阻抗圆,如图 5 所示。目前大部分发变组失磁保护根据异步阻抗圆整定,当机组运行时的阻抗进入阻抗圆内时,失磁保护动作<sup>[14-18]</sup>。假设失磁保护定值分别为  $X_1$  和  $X_2$ ,  $X_1$  和  $X_2$  是 2 个数值小于 0 的定值。

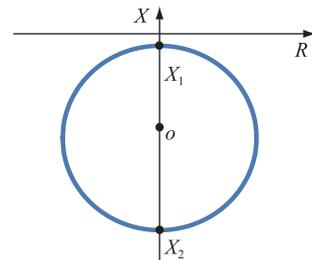


图 5 发电机异步边界阻抗圆

Fig.5 The curve of asynchronous circles

开展失磁保护校核时,根据低励限制定值确定

的有功、无功及进相运行时的机端电压计算不同工况的阻抗值,计算公式如式(8)所示。

$$\begin{cases} R = \frac{U}{I} \frac{P}{S} = \frac{U^2 P}{P^2 + Q^2} \\ X = \frac{U}{I} \frac{Q}{S} = \frac{U^2 Q}{P^2 + Q^2} \end{cases} \quad (8)$$

在  $R-X$  平面上计算阻抗值到圆心的距离  $r$ , 如式(9)所示, 考虑的失磁保护的安全裕度, 一般距离是半径的 1.05 倍以上, 即认为该定值与失磁保护配合。

$$r = \sqrt{R^2 + \left(X - \frac{X_1 + X_2}{2}\right)^2} \geq 1.05 \left(\frac{X_1 - X_2}{2}\right) \quad (9)$$

如果低励限制定值确定的阻抗值到圆心的距离不足半径的 1.05 倍时, 需要相应调整低励限制定值, 满足与失磁保护配合的问题。

### 3 实例分析

某 600 MW 机组励磁调节器为 B 型励磁调节器, 该机组参数:  $S_N = 684 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $U_N = 20 \text{ kV}$ ,  $\cos \varphi = 0.95$ ,  $X_q \approx X_d = 2.155 \text{ p.u.}$ 。根据试验数据, 3 个有功工况 325 MW, 490 MW, 650 MW 对应的进相能力分别为:  $-226 \text{ Mvar}$ ,  $-170 \text{ Mvar}$ ,  $-75 \text{ Mvar}$ , 进相至最深时, 机端电压均降至 95%  $U_N$  以下。

根据公式(3—6)可计算出低励限制对应的 5 个有功点最贴近进相能力曲线的无功值。假设初始定值根据这个无功值来确定, 则不同有功点的初始定值则为对应的无功值除以额定容量。由于励磁调节器的动作偏差, 根据进相试验时电压值, 通过公式(2)计算出在当前定值下 PID 输出值, 根据动作特性推算出不同有功的动作值, 计算结果如表 1 所示。

表 1 低励限制定值及对应动作值

Tab.1 The first low excitation limiter setting value and the action value

P 定值 / p.u.	对应 P / MW	接近能力曲线的无功 / Mvar	Q 初始定值 / p.u.	初始定值下动作值 / Mvar
0	0	-278	-0.407	-240
0.25	171	-278	-0.407	-246
0.50	342	-220	-0.322	-195
0.75	513	-156	-0.229	-140
1.00	684	-55	-0.080	-52

从表 1 可看出, 将接近能力曲线的无功值作为低励限制定值后, 实际机组在不同有功下的动作值均提前于进相能力曲线, 不利于机组进相能力的充分发挥。

根据优化算法, 将接近进相能力曲线的无功值作为动作值, 并以进相时的实际电压进行计算, 根据式(7)计算出优化后的低励限制定值(Q 优化定值 1), 再针对优化后的定值进行失磁保护核算。该机组失磁保护定值  $X_1 = -0.126 \text{ p.u.}$ ,  $X_2 = -2.11 \text{ p.u.}$ , 根据式(8)、(9), 算出  $R-X$  平面上的阻抗点到圆心的距离是阻抗圆半径的倍数(定值 1 阻抗圆半径倍数), 如表 2 所示。

表 2 低励限制优化定值及计算结果

Tab.2 The optimized low excitation limiter setting value and calculation results

Q 优化定值 1 / p.u.	定值 1 阻抗圆半径的倍数	Q 优化定值 2 / p.u.	定值 2 阻抗圆半径的倍数	优化定值下动作值 / Mvar
-0.472	0.803	-0.417	1.055	-246
-0.413	1.091	-0.413	1.091	-278
-0.360	1.227	-0.360	1.227	-220
-0.255	1.326	-0.255	1.326	-156
-0.084	1.386	-0.084	1.386	-55

由于 0 工况时半径值小于 1.05 倍阻抗圆半径值, 需要针对有功为 0 时的定值进行调整, 使之与失磁保护配合。调整时, 取  $P=0$ , 将式(9)取等号, 计算无功值及对应定值, 并记为优化定值 2。该定值与失磁保护配合合理, 且该定值下动作值与机组进相能力更接近。

### 4 结语

针对 UNITROL5000 励磁调节器低励限制的动作值和整定值存在较大偏差、不利于电网低负荷期间机组进相能力发挥的问题, 文中详细分析 ABB UNITROL5000 励磁调节器两种类型的低励限制动作特性, 提出动作值接近机组进相能力为目标的整定方法, 并根据机组失磁保护定值进行低励限制校核, 最后通过实例验证方法的可行性。结果表明, 通过该方法整定 ABB 励磁调节器的低励限制定值, 既满足与失磁保护配合, 又能够充分发挥机组实际进相运行能力。该整定方法可为工程实际中同类型励磁调节器的低励限制定值的合理整定提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 竺士章. 发电机励磁系统试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 80.  
ZHU Shizhang. Generator excitation system test[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 80.
- [2] 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.  
GUO Chunping, YU Zhen, YIN Xiutao. Coordinative setting cal-

- ulation of minimum-excitation limit and loss-of excitation protection for generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32 (28):129-132.
- [3] 戴申华. 一起励磁系统通道异常导致的故障分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):106-108.  
DAI Shenhua. Analysis of the tip cause by abnormal channel of excitation system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):106-108.
- [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):63-67.  
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):63-67.
- [5] 丁傲, 谢欢, 刘平, 等. 发电机励磁调节器低励限制协调控制分析[J]. 电网技术, 2012, 36(8):193-198.  
DING Ao, XIE Huan, LIU Ping, et al. Analysis on coordinated control of under-excitation limiter of generator excitation regulator [J]. Power System Technology, 2012, 36(8):193-198.
- [6] 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 Zhaoxu, SUN Huadong, et al. General principle of generator under excitation limiter settings [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6):55-60.
- [7] 同步发电机进相试验导则:DL/T 1523—2016[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.  
Guide on leading power factor operation test of synchronous generator:DL/T 1523—2016 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [8] 解兵, 徐珂, 刘建坤, 等. 电网低负荷期间发电机组进相运行分析及管理[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(4):28-31.  
XIE Bing, XU Ke, LIU Jiankun, et al. Analysis and management of generators' leading phase during low load in power grid [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(4):28-31.
- [9] 解兵, 徐珂, 周前, 等. 一起机组进相试验时失磁保护动作原因分析[J]. 电测与仪表, 2017, 56(17):123-128.  
XIE Bing, XU Ke, ZHOU Qian, et al. Reason analysis of loss of excitation protection action during generator leading phase test [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 56(17):123-128.
- [10] 解兵, 徐珂, 刘建坤, 等. 发电机组进相能力挖掘技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(5):102-107.  
XIE Bing, XU Ke, LIU Jiankun, et al. Study on the mining technology of leading phase ability of generator [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(5):102-107.
- [11] 徐涛, 张振程, 李梅, 等. UNITROL5000 励磁调节器 PSS 参数的优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23):88-91.  
XU Tao, ZHANG Zhencheng, LI Mei, et al. Optimization for UNITROL5000 excitation adjuster PSS parameters [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23):88-91.
- [12] 潘子昊, 王思齐, 蒋志鹏, 等. 五相双绕组感应发电机励磁控制系统硬件设计与实现[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):7-11.  
PAN Zihao, WANG Siqi, JIANG Zhipeng, et al. Hardware design and realization of excitation control system for five-phase dual stator winding induction generator [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):7-11.
- [13] 解兵, 徐珂, 汪成根, 等. 励磁调节器低励限制提前动作原因分析及措施[J]. 广东电力, 2017, 30(7):30-34.  
XIE Bing, XU Ke, WANG Chengen, et al. Reason analysis and countermeasures for advanced action of low excitation limit of excitation regulator [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7):30-34.
- [14] 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.  
Large generator and transformer relaying protection setting calculation guide:DL/T 684—2012 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [15] 鲜霄, 寻志伟, 周道军. 大型发电机运行与无功控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5):99-105.  
XIAN Xiao, XUN Zhiwei, ZHOU Daojun. Operation and reactive power control of large tuibing-generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5):99-105.
- [16] 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.  
WANG Weijian. Principle and application of relay protection of electrical main equipment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [17] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:136-138.  
WANG Weijian. Generator transformer relay protection application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005:136-138.
- [18] 李辉, 鲁功强, 王育学, 等. 大型水轮发电机失磁保护与低励限制配合问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5):68-72.  
LI Hui, LU Gongqiang, WANG Yuxue, et al. Discussion on coordination between loss of excitation protection and under excitation limit control for large hydro-generator [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5):68-72.

## 作者简介:



解兵

解兵(1979—),男,硕士,高级工程师,从事源网协调工作(E-mail: xbcquhv@163.com);

徐珂(1977—),男,硕士,高级工程师,从事源网协调工作(E-mail: newwander@163.com);

罗凯明(1978—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统稳定分析、调度运行工作。

## Optimized Setting Method Research of UNITROL5000

### Excitation System Low Excitation Limit

XIE Bing<sup>1</sup>, XU Ke<sup>1</sup>, LUO Kaiming<sup>2</sup>, LIU Jiankun<sup>1</sup>, ZHOU Qian<sup>1</sup>

(1. State Grid Offshore Wind Power Combined Network Laboratory

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** It is different between the action value and the setting value of UNITROL5000 excitation system low excitation limit during generator's leading phase operation, and which leads to that the unit can't play its leading phase ability, and the line voltage operates much higher, it is not conducive to the safe operation of the power grid. This paper analyzes the low excitation limit action characteristics and influence factors of two different types of excitation system. Then an optimized setting method of low excitation limit is proposed. Finally, the feasibility of the tuning method is verified by an example. The low excitation limit setting method considers the generator's leading phase ability and the excitation-loss protection, the action value is as close as possible to the generator's leading phase ability and matches the excitation-loss protection reasonably after setting the optimized value of low excitation limit. The low excitation limit setting method provides a reference in the engineering practice for UNITROL5000 excitation system.

**Key words:** UNITROL5000 excitation system; low excitation limit; setting method; leading phase; excitation-loss protection

(编辑 方 晶)