DOI:10.3969/j.issn.1674 - 1951.2019.09.017

导纳型失磁保护与励磁装置低励限制的整定配合

Setting coordination of field loss protection with admittance and excitation device low excitation limit

张波

ZHANG Bo

(上海申能临港燃机发电有限公司,上海 201306)

(Shanghai Shenergy Lingang CCGT Power Generation Company Limited, Shanghai 201306, China)

摘 要:为防止失磁保护误动,发电机失磁保护和励磁低励限制在整定上必须相互配合。从功率计算公式出发, 推导出了有功功率 - 无功功率(P-Q)平面转化成导纳平面的过程。介绍了导纳型失磁保护和 ABB U6800 励磁 装置低励限制的作用原理。以上海申能临港燃机发电有限公司 *3 发电机为例,对发电机失磁保护进行整定计 算。对发电机的进相能力进行实际测试,从而得到励磁装置低励限制的精确定值参数。最后对发电机失磁保护 与励磁装置低励限制进行整定配合校核,从而保证低励限制先于失磁保护之前动作,防止失磁保护误动。

关键词:发电机;进相;励磁;P-Q平面;导纳平面;失磁保护;低励限制

文献标志码:B

中图分类号:TP 214

文章编号:1674-1951(2019)09-0063-04

Abstract: To prevent the generator field loss protection from being misoperated, it must coordinated with excitation device low excitation limit. Based on the calculation formula of power, it deduced the process of transformation from P - Q plane into admittance plane, and introduced the principle of field loss protection with admittance and the principle of low excitation limit of ABB U6800 excitation device. Taking the No. 3 generator of Shanghai Shenergy Lingang CCGT Power Generation Company Limited as an example, the calculation of generator field loss protection was set up. The actual capability of leading phase of the No. 3 generator was tested, and the exact parameters of the low excitation limit of the excitation device low excitation limit was checked, so as to ensure low excitation limit to precede field loss protection, and prevent the field loss protection from being misoperated.

Keywords: generator; leading phase; excitation; P - Q plane; admittance plane; field loss protection; low excitation limit

0 引言

根据上海市电力公司的要求,发电厂并网机组 应具备进相运行的能力。在进相运行时,一旦励磁 过低,励磁装置低励限制应先于发电机失磁保护动 作进行干预。只有当发电机失磁保护和励磁低励限 制整定配合正确,才能防止失磁保护误动。上海申 能临港燃机发电有限公司(以下简称临港燃机)的 发电机选用西门子7UM62 系列保护装置,其失磁保 护是基于导纳平面设定的,而 ABB U6800 励磁装置 的低励限制功能是基于有功功率 - 无功功率 (*P*-*Q*)平面整定的。要校核失磁保护和低励限制 的整定,需要将上述保护转换到同一平面。

收稿日期:2018-11-17;修回日期:2019-06-20

1 保护原理

1.1 导纳型失磁保护

7UM62 系列保护装置失磁保护的定子侧判据是 根据电流和电压的正序分量计算出的导纳,用以判 断是否失磁(保护动作出口还需要有其他的判据)。 实际上这种导纳的计算原理是从发电机的 P - Q 运 行曲线极限图转化而来的。汽轮发电机 P 和 Q 的 简化计算公式分别为

$$P = \frac{EU}{X_{\rm d}} \sin \delta , \qquad (1)$$

$$Q = \frac{EU}{X_{\rm d}} \cos \delta - \frac{U^2}{X_{\rm d}} , \qquad (2)$$

式中:E为发电机励磁电动势;U为发电机机端电 压; X_{d} 为直轴同步电抗; δ 为发电机功角, 是E和U 的向量夹角。当 $\delta < 90^{\circ}$ 时,发电机能够正常运行; 当 $\delta = 90^{\circ}$ 时,发电机运行在静态稳定极限;而当 $\delta > 90^{\circ}$ 时,发电机失步。将 $\delta = 90^{\circ}$ 代入式(1)和式(2) 可以得到P = 0,故静态稳定极限下

$$Q = -\frac{U^2}{X_{\rm d}} \, . \tag{3}$$

由式(3)可得到理论稳定极限,即发电机低励 后的运行边界由机端电压和同步电抗共同决定,如 图1所示,其中φ为发电机功率因数角。实际上,在 发电机并网后,考虑到发电机和系统之间的联系电 抗以及保留一定静态稳定裕度的需要,发电机的实 际设计稳定极限要小于理论值。



图 1 发电机理论稳定运行极限 P-Q 图 Fig. 1 Theoretical stable operation limit P-Q diagram of generator

为了将发电机理论稳定运行极限 P-Q 平面 转化为导纳平面,需要进一步推导出视在功率

$$S = UI = U^{2} \frac{I}{U} = U^{2} \frac{1}{Z} = U^{2} \frac{1}{R + jX}, \quad (4)$$

式中: *U* 为系统电压(在进行发电机功率计算时,可 看做发电机机端电压);*I* 为电流;*Z* 为阻抗;*R* 为电 阻;*X* 为电抗。将式(4)进一步推导得

$$S = U^{2} \frac{R}{R^{2} + X^{2}} + U^{2} \frac{-jX}{R^{2} + X^{2}}$$
 (5)

结合复功率概念 (S = P + jQ), 可得

$$P = U^2 \frac{R}{R^2 + X^2} = U^2 \times G , \qquad (6)$$

$$Q = U^2 \frac{-X}{R^2 + X^2} = U^2 \times (-B) , \qquad (7)$$

式中:G为电导;B为电纳。由式(6)和式(7)可知, 将图1的P-Q平面横、纵坐标同时除以U²,得出关 于导纳平面上的发电机理论稳定运行极限图,如图 2所示。

从图 2 可以看出,静态稳定极限与 B 轴在接近 1/X_d(即直轴同步电抗的倒数)处相交。将转化而 来的导纳平面用作失磁保护的判据时,只需考虑 X_d,不再需要考虑电压的大小,使得失磁保护的整定



更加简单。

1.2 励磁设备低励限制

ABB U6800 励磁设备的低励限制功能由装置 内的 P - Q 限制器完成,此限制器可以对发电机低 励进行干预,避免发电机进入非稳定区域或发生失 步。P - Q 限制器可以在 P 为 0%,20%,40%, 60%,80%或 100%时设定 6 个与发电机额定电压 相关的 Q,从而得到 P - Q 平面上的 6 个坐标点,以 此定义发电机的稳定边界曲线。但当发电机低励 时,机端电压会降低,这时 P - Q 限制器根据公式

 $Q = Q(P) - (1 - U_a^2)/X_d$, (9) 自动调整发电机稳定限制边界曲线,以实现精确保 护,式中:Q(P)为发电机稳定边界曲线上的无功值; U_a 为发电机实际电枢电压。

2 导纳型失磁保护和低励限制的整定

2.1 导纳型失磁保护的整定

2.1.1 导纳型失磁保护的动作特性

保护装置 7UM62 的失磁保护元件动作特性由 三段保护特性构成,如图 3 所示。



Fig. 3 characteristics of field loss protection on the admittance plane

特性1与特性2曲线模拟同步电机的静态稳定 极限,如果保护装置计算出的导纳结果超出了特性 1和特性2曲线,保护装置将发信并以一较长延时 发跳闸命令,而如果在特性1或特性2动作的同 时检测到发电机励磁电压低,则将以一短延时发跳 电抗整定(标幺值)为

闸命令。而特性3模拟发电机的动态稳定曲线,当导纳的测量值越过该曲线时发电机将失去稳定,要求保护装置立即发跳闸命令,因此超过特性3时保护装置也以一短延时发跳闸命令。

2.1.2 导纳型失磁保护的整定计算 取1.05的安全裕度,特性1用发电机直轴同步

$$\begin{split} &-1.05 \times \frac{1}{X_{\rm d}} \times \frac{I_{\rm gn}}{U_{\rm gn}} \times \frac{U_{\rm PT.\, prim}}{I_{\rm CT.\, prim}} = -1.05 \times \\ &\frac{1}{2.188} \times \frac{13\,032}{21\,000} \times \frac{21\,000}{16\,000} = -0.39 \; (\rm p.\, u.\,) \;\;, \end{split}$$

式中: I_{gn} 为发电机额定电流,13032A; U_{gn} 为发电机额 定电压,21.00kV; $U_{PT. prim}$ 为发电机机端电压互感器 (PT)额定一次电压,21.00kV; $I_{CT. prim}$ 为发电机机端电 流互感器(CT)额定一次电流,16000A; X_d = 2.188 Ω 。

特性1的角度 α_1 的选择以同步发电机稳定特性的倾角为定值,按照发电机厂家给出的发电机容量曲线(如图4所示,图中 PF为功率因数),稳定极限曲线3与横轴的夹角为100°,即特性1的整定值为:横轴-0.39 p.u.,倾角100°,延时30 s。

特性2与特性1共同模拟发电机静态稳定边界,因此定值选取图4上曲线3与横轴夹角90°的线段,该线段的延伸段与横轴的交点为-240.00 MV · A,因此特性2的横轴标幺值为

$$\frac{1}{X_{\rm d.sec}} = \frac{Q}{U_{\rm gn}^2} \times \frac{I_{\rm gn}}{U_{\rm gn}} \times \frac{U_{\rm PT. prim}}{I_{\rm CT. prim}} = \frac{-240 \times 10^6}{21\,000^2} \times \frac{13\,032}{21\,000} \times \frac{21\,000}{16\,000} = -0.44 \,(\text{p.u.}) ,$$

即特性2的整定值为:横轴-0.44 p.u.,倾角90°, 延时30 s。

特性 3 用于匹配同步电机的动态稳定极限特性,根据保护装置说明书可在直轴同步电抗的倒数 与直轴暂态电抗的倒数之间选取一个合适的值作为 失磁保护特性 3 的定值,且这个值必须大于 1,角度 在 80°~110°之间。所以,特性 3 的整定值为:横轴 -1.10 p.u.,倾角 100°,延时 0.3 s。

低电压闭锁功能的启动定值可取装置默认值 (25.0 V)。

励磁电压低元件的整定按照保护装置说明书, 整定到空载时励磁电压的 50% 左右。根据发电机 厂家给出的技术数据,发电机空载时励磁电压为 144.0V,励磁设备电压分压器变比为 10: 1,则励磁 电压监视功能的启动定值可设为 7.2V,延时按照装 置说明书给出的典型设置整定为 0.5 s。

2.2 励磁设备低励限制的整定

2.2.1 发电机进相试验

为得到临港燃机发电机的进相能力、为励磁设



图 4 发电机容量曲线 Fig. 4 Generator capacity curve

备低励限制参数设置提供依据,分别对4台相同容量的发电机进行进相试验。以^{#3}发电机为例,试验考虑了实际运行情况(发电机功角不超过70°)和一定的稳定裕度(6%的静稳定裕度),对4个发电机带厂用电运行的工况进行进相试验,试验结果见表1。

表1 *3发电机进相运行工况

Tab. 1 Leading phase operation conditions

or no. 5 generator					
工况	P/MW	$Q/(MV \cdot A)$	U/kV	I∕A	$\cos \varphi$
1	5	-119.96	18.99	337	0.04
2	250	-115.85	19.02	741	0.91
3	341	-108.77	18.99	962	0.95
4	422	-104.52	19.02	1 164	0.97

进相深度受到机组各级电压的限制,特别是发电机机端电压,厂用电电压可由有载调压进行调节。 表1的4个工况中,发电机机端电压(额定电压 21.00kV)均接近于运行下限(90%的额定机端电 压,即18.90kV)。由此可得到[#]3发电机在P为5, 250,341,422 MW时的进相运行能力。

2.2.2 励磁设备低励限制整定

对发电机进相试验得到的数据和进相能力进行 综合分析,同时考虑机组安全运行的实际情况,对励 磁设备初始低励限制整定值进行优化,得到最终正 确的整定值,见表2。初始整定、进相能力和优化后 的低励限制曲线如图5所示。

Tab. 2	Low excitation limi	itation device	
<i>P</i> ∕p. u.	Q∕p. u.	P/MW	Q∕(MV • A)
0.00	-0.28	0	- 132.72
0.20	-0.28	94.8	-132.72
0.40	-0.28	189.6	-132.72
0.60	-0.25	284.4	-118.50
0.80	-0.20	379.2	-94.8
1.00	-0.10	474.0	-47.4

表 2 励磁装置低励限制整定值



Fig. 5 Low excitation limit curve of excitation device

3 失磁保护与低励限制的配合校核

励磁装置低励限制曲线是基于 P - Q 平面整定的,和导纳平面的失磁保护进行配合,需要将低励限制曲线转化到导纳平面。根据图 5 低励限制曲线的趋势,只要选取线段 AB 和 BC 进行转换并比较即可。

通过表 2 可知, 线段 AB 与横轴的交点为 -132.72 MV · A, 倾角为90°; 通过计算, 线段 BC 的 延伸段与横轴的交点为 - 161.16 MV · A, 倾角为 81°。参考发电机失磁保护将无功功率转换成导纳 平面标幺值的方法, 线段 AB, BC 转换到导纳平面后 的标幺值

$$\begin{split} \frac{1}{X_{\text{d.}AB}} &= \frac{Q}{U_{\text{gn}}^2} \times \frac{I_{\text{gn}}}{U_{\text{gn}}} \times \frac{U_{\text{PT. prim}}}{I_{\text{CT. prim}}} = \frac{-132.\ 72 \times 10^6}{21\ 000^2} \times \\ &= \frac{13\ 032}{21\ 000} \times \frac{21\ 000}{16\ 000} = -\ 0.\ 25\ (\text{ p. u. })\ , \\ \frac{1}{X_{\text{d.}BC}} &= \frac{Q}{U_{\text{gn}}^2} \times \frac{I_{\text{gn}}}{U_{\text{gn}}} \times \frac{U_{\text{PT. prim}}}{I_{\text{CT. prim}}} = \frac{-161.\ 16 \times 10^6}{21\ 000} \times \\ &= \frac{13\ 032}{21\ 000} \times \frac{21\ 000}{16\ 000} = -\ 0.\ 3\ (\text{ p. u. })\ , \end{split}$$

即线段 AB 的特性为: 横轴 - 0.25 p. u., 倾角 90°。 线段 BC 的特性为: 横轴 - 0.30 p. u., 倾角 81°。 将低励限制线段 AB 的特性、线段 BC 的特性和 失磁保护特性 1、特性 2、特性 2 归到同一坐标,如图 6 所示。



图 6 失磁保护特性曲线与低励限制曲线的比较 Fig. 6 Comparison diagram of field loss protection characteristic curve and low excitation limit curve

从图 6 上可以明显看出,低励限制曲线与失磁 保护特性曲线在当前象限没有交点,且失磁保护特 性曲线在低励限制曲线的外围,说明发电机在各种 可能的低励情况下,励磁装置的低励限制都是先行 干预的,如果发电机失磁严重,瞬间被拖进非稳定区 时,失磁保护就会根据情况判断并延时动作。因此 得出结论,失磁保护和低励限制的配合是正确的。

4 结束语

本文结合临港燃机失磁保护和励磁装置低励限 制的特性,详细介绍了导纳型失磁保护的整定方法, 通过进相试验优化了低励限制的整定参数。最后用 平面转换的方法校核了失磁保护和低励限制配合的 正确性,为其他电厂相同配置的失磁保护整定提供 了参考依据。

参考文献:

- [1]肖明,孙承海,罗敏,等.发电机失磁保护与低励限制配合 策略研究[J].山东电力技术,2018,45(2):49-51,65.
- [2]王晓源.发电机进相运行时失磁保护动作特性分析[J]. 智能城市,2018,4(5):164.
- [3] 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.
- [4] 沈全荣, 陈佳胜, 陈俊, 等. 基于导纳特性的水轮发电机 失磁保护新判据[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 220-223.
- [5]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.
- [6] 王正元, 兀鹏越, 吴加坤. 基于导纳特性的发电机失磁保 护整定与调试[J]. 电气技术, 2014(2):(下转第69页)

因此,假定某项目机组锅炉设计额定耗煤量为 1000 t/h,则按设计规程上煤系统设计出力为 1000 ×1.35 = 1350 (t/h);按实际年运行小时分析, 机组现有实际耗煤量为0.77 ×1000 = 770 (t/h)。上 煤系统降出力优化后,其当前实际出力与机组锅炉 设计耗煤量一致,即为1000 t/h。去冗余优化后系 统出力与原设计系统出力比较见表1。

表 1 上煤系统降出力优化比较 Tab. 1 Comparison of derating schemes for

coal handling systems							
项目	原设计值	去冗余优化工况①					
上煤系统出力/(t・h ⁻¹)	1 350	1 000					
机组设计耗煤量/(t・h ⁻¹)	1 000						
机组实际耗煤量/(t・h ⁻¹)		770					
上煤系统出力/设计耗煤量	1.35	1.00					
上煤系统出力/实际耗煤量	1.75	1.30					
上煤系统运行时间 2 /h	17.8	18.5					

注:①去冗余优化工况假定锅炉耗煤量为设计额定值的77%; ②上煤系统运行时间为锅炉每日运行24h所需总量与上煤系统 出力的比值。

由表1可知,在当前发电市场形势下,发电机组 锅炉耗煤量为设计额定值的77%计算(实际情况该 数据更低),上煤系统按规程设计出力与锅炉实际 耗煤量的比值达到了1.75,裕量偏大。而上煤系统 去冗余优化出力与实际耗煤量比值为1.30,接近设 计规程要求,基本能满足要求。

在实际负荷与设计负荷比值不高于 77% 的情况下,上煤系统实际运行时间(18.5 h/d)与设计运行时间(17.8 h/d)相差不到 1 h,对系统的影响不大。

5 结束语

燃煤发电机组年利用小时数因经济结构调整及 新能源大力发展的影响而明显下降将是常态,且有 进一步下降的趋势,上煤系统存在去冗余优化的空

(上接第66页)64-67,81.

- [7]刘桂林,宋玮,宋新立. 基于涉网保护的低励限制、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.
- [8]陆秋瑜,徐飞,胡伟,等.考虑机网协调的新型发电机失磁保护方案研究[J].电力系统保护与控制,2013,41 (9):1-6.
- [9] 贾文双, 岳雷, 措姆, 等. 发电机失磁保护与低励磁限制 的配合方法[J]. 华北电力技术, 2013(1):11-14, 30.
- [10]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.

间及可能性。

双路系统经多年运行经验证明是上煤系统可靠 性的根本保障,在此基础上对上煤系统进行降出力 去冗余优化并不影响系统的可靠性。

以本文假定上煤系统出力与额定耗煤量的比值 由 135%下调至 100% 为例,系统可靠性未发生本质 改变。分析表明,虽然上煤系统降出力优化后系统 理论运行时间增加,但是对系统的实际影响有限。 而以往火力发电机组高负荷运行时,经常出现因煤 种变化导致锅炉实际耗煤量大于设计值、上煤系统 出力与实际耗煤量比值变小而延长运行时间的情 况,实践证明机组安全运行均未受影响。

因此,本文建议在新建或改建工程中经充分论 证、准备后,上煤系统可根据项目实际情况进行降出 力去冗余优化。

参考文献:

- [1]火力发电厂设计技术规程:DL 5000-200[S].
- [2]大中型火力发电厂设计规范:GB 50660—2011[S].
- [3]小型火力发电厂设计规范:GB 50049—2011[S].
- [4]周瑞强.火力发电厂单路上煤系统研究[J].山东工业技术,2014(23):67-68.
- [5] 钱锡铭. 上煤系统采用单系统的研究[J]. 电力勘测设 计,2016(S2):304-308.
- [6] 钱锡铭. 上煤系统采用单系统的调研分析[J]. 华电技术,2016,38(7):32-34,39.
- [7]北京起重运输机械设计研究院,武汉丰帆科技开发有限 责任公司.DTII(A)型带式输送机设计手册[M].2版. 北京:冶金工业出版社,2013.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

李济川(1975—),男,四川宜宾人,高级工程师,从事火 力发电厂运煤系统设计方面的工作(E-mail:lijichuan@gedi. com.cn)。

- [11] 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.
- [12] 裘愉涛,陈水耀,陈俊,等.一种基于阻抗特性的发电机 低励限制方法[J].电力系统保护与控制,2012,40(5): 116-118.

(本文责编:陆华)

作者简介:

张波(1983—),男,上海人,工程师,工学硕士,从事发 电厂设备管理部电气设备管理工作(E-mail:zhangbo@lgccgt.com)。