大型汽轮发电机组的扭振快速保护

张琦雪,马志恒,肖 鹏,都成刚,王 凯,杨 扬,周荣斌,王 强,王 光 (南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

摘要:串补电容可能引发次同步暂态扭矩放大,极端情况下在0.5 s内导致汽轮发电机组大轴损伤,常规扭应力 保护来不及保护。提出一种快速保护方法,该方法将电流或有功功率的工频变化量越限作为启动判据,波动转 速幅值越限作为动作判据。针对XM地区M电厂的机组,选取12个算例进行时域仿真分析,结果表明,波动转 速幅值与扭振幅值有较好的一致性,近似成正比;在仿真的转速中叠加现场实测的转速噪声信号,对保护算法 及保护逻辑进行验证,结果表明扭振较轻时保护不动作,扭振较重时保护快速动作,最恶劣工况下暂态扭矩放 大导致的疲劳值可降低至15%以下。需注意机组脱网之后仍存在扭振的影响,保护定值应有足够裕度。 关键词:汽轮发电机;次同步谐振;次同步振荡;扭振保护;暂态扭矩放大;电容串补

中图分类号:TM 77 文献标志码:A DOI:10.16081/j.epae.202010014

0 引言

次同步振荡是电力系统机电耦合作用下的特殊 振荡,严重时可能导致大型汽轮发电机组转子轴系 薄弱位置因扭振产生金属疲劳而损坏,造成重大事 故。自20世纪70年代起,国内外进行了大量的相关 研究,如文献[1]系统阐述了振荡机理、系统分析方 法,文献[2-3]进行了充实的理论分析,并且给出了 监测、保护、抑制的方法及分析结果。

在引起汽轮发电机组扭振的几种方式中,暂态 扭矩放大最为严重。暂态扭矩放大通常指电容串补 条件下电气谐振频率与大轴固有扭振频率互补,由 于系统大扰动而产生很大扭矩振荡的现象^[45]。暂 态扭矩放大可以在很短的时间内破坏机组大轴,因 此需要有快速扭矩保护的措施。文献[6-8]均提及 使用电气量实现保护的方法,即测量机端三相电压 和电流,计算瞬时电磁功率,滤出次同步频段的信 号,采用功率振荡幅值越限判据实现保护,其优点是 容易实现,缺点是该瞬时电磁功率在大扰动故障暂 态期间并不能完全真实地反映扭矩。

扭应力(TSR)保护已在现场得到不少应用,它 直接测量发电机组机头或机尾转速,通过多阶模式 滤波,结合简单多质量块模型辨识出各转子之间的 断面扭矩,计算模态转速及断面疲劳,采用模态发 散、疲劳越限实现保护,其优点是能够比较准确地计 算断面扭矩和分析疲劳,缺点是对装置要求高、实现 难度大、计算复杂。同时文献[9]指出,扭振保护(文 中称为torsional interaction relaying)在应用时,多阶 滤波器导致的响应延时可能超过0.5 s,在极端的暂 态扭矩放大情况下机组已经损坏,因而建议采用适 当的滤波以减少延时。

本文针对 XM 地区 M 电厂进行时域仿真分析, 指出其存在暂态扭矩放大的风险,提出结合电气量 与机械量测量的扭振快速保护方法,并通过算例进 行了分析和讨论。

1 M电厂机组存在暂态扭矩放大问题

1.1 机组及电网系统概况

国内 XM 地区能源基地配套多个煤电项目,以 660 MW 机组为主力机组,另有 M 电厂 2×350 MW 供 热机组。为提高该地区的功率送出能力,在外送 1 000 kV 特高压交流线路上配套双线双串补,每回线 路串补度达41.2%;此外,经过 ±800 kV 特高压直流 输送功率至 TZ 地区。XM 地区的电网结构见图1。





1.2 问题的引出

对XM地区电网及其相关电源点的机组进行建模仿真,大量计算结果表明该地区存在次同步振荡及汽轮发电机组扭振的风险,高压直流换流站的影

响较小,电容串补的影响很大。

214

在这几个电厂中,M电厂的情况最为严重,在某些极端的工况下存在暂态扭矩放大的可能。例如在 某仿真实例中,M电厂单机半载,电网1000 kV输电 通道双线双串补,在图1中的F₃位置发生三相故障, 切除1回线路,对应的仿真结果如图2所示。图中, *T*_{HIP-LP}为高中压缸(HIP)转子和低压缸(LP)转子之间 的扭矩,*T*_{LP-GEN}为LP转子和发电机(GEN)转子之间 的扭矩,均为标幺值,后同。由图可见,故障发生并 切除之后,在大扰动及电容串补的影响下,M电厂机 组出现暂态扭矩放大的现象,*T*_{HIP-LP}、*T*_{LP-GEN}波动剧 烈,可造成各轴承及联轴器疲劳损伤。其中,推力轴 承位置最为薄弱,在故障后 0.224 s 时刻其疲劳值 *F*_{Acc}瞬间跃升至50.41%,危害很大。为保护机组,需 要在很短的时间内做出判别并及时解列机组。





1.3 TSR保护难以应对暂态扭矩放大

TSR保护装置的判据主要是疲劳越限、模态转 速发散。为了得到精准的模态转速,TSR保护采用 多阶模式滤波,受滤波器响应的影响,在系统大扰动 后的0.5 s左右,扭矩辨识结果明显偏小,疲劳计算结 果也偏小(参见文献[3]第363页的图11.16),因此 一旦出现恶劣的暂态扭矩放大,其发展迅速,即使后 续TSR保护动作了,暂态扭矩放大产生的损伤已不 可逆转。故TSR保护不能直接用于快速扭矩保护。

2 扭振快速保护方案

扭振快速保护关注的是暂态扭矩放大作用下, 机组大轴薄弱断面在很短时间内承受较大扭矩的恶 劣情况,暂态扭矩放大由电网短路事故引起,或者由 不合理操作引起,比如非同期合闸。事故特征反映 为:①电压、电流突变,或者功率振荡;②机械转速信 号中出现明显的幅度较大的扭振分量。 为兼顾保护的快速性和可靠性,本文在设计保 护方案时同时考虑机械量和电气量的故障特征,保 护装置测量发电机组大轴转速、发电机机端三相电 压三相电流,进行保护计算,具体如下。

(1)测量机头或机尾转速 ω ,经低通滤波器 $H_{LP}(s)$ 、 带阻滤波器 $H_{BS}(s)$ 滤波,得到转速差信号 $\Delta \omega$ 为:

$$\Delta \omega = H_{\rm LP}(s) H_{\rm BS}(s) \left(\omega - \omega_{\rm n} \right) \tag{1}$$

其中, ω_n 为额定转速。为减少滤波延时并兼顾滤波 效果, $H_{LP}(s)$ 、 $H_{BS}(s)$ 可采用二阶Butterworth滤波器, $H_{LP}(s)$ 的截止频率可取为40 Hz, $H_{BS}(s)$ 的中心频率 可取为50 Hz。

(2)取移动数据窗,窗长时间为T,计算 $\Delta\omega$ 的幅 值 $\Delta\omega_{am}$ 为:

$$\Delta \omega_{\rm amp} = f\left(\Delta \omega\left(\tau\right)\right)\Big|_{t=T \le \tau \le t}$$
(2)

其中,t为当前时刻;函数f(x)表示求取当前时刻时 间窗[t-T,t]內变量x的幅值,计算方法并不唯一,可 采用全周波傅氏算法计算幅值,也可为了提高保护 动作速度,改为短窗傅氏算法、瞬时峰值检测法等。

(3)测量发电机机端三相电压 u_a, u_b, u_c 和三相电流的瞬时值 i_a, i_b, i_c ,计算暂态功率p;同样取移动数据窗,计算p的波动分量的幅值 ΔP_{amp} ,如式(3)所示。

$$\begin{cases} p = \sum_{k=a,b,c} u_k i_k \\ \Delta P_{amp}(t) = f\left(p(\tau) - p_{dc}(\tau)\right) \Big|_{t=T \le \tau \le t} \end{cases}$$
(3)

其中,p_{de}为当前时刻之前的一个时间窗内电磁功率p 的直流分量。

(4)计算发电机三相电流的工频变化量幅值 $\Delta I_{a} \Delta I_{b} \Delta I_{c}$ 。

得到上述计算结果后,按照图3所示的逻辑进行保护判别。保护判据分为启动判据、动作判据和闭锁判据, ΔI_{set} 、 ΔP_{set} 、 $\Delta \omega_{set}$ 为各越限判据的定值, T_1 、 T_2 为短延时。当电流工频变化量幅值越限或者功率 波动幅值越限时置启动标志,启动条件不满足后,经 短延时 T_1 返回;转速差幅值越限后,经整定的短延时 T_1 置动作标志;当保护装置判别出电压互感器断线、





电流互感器断线、转速异常等条件后,闭锁该保护。

3 仿真算例分析

3.1 算例工况

事先经频率扫描等手段,对可能的工况进行扫 描,筛选出较严重的工况进行详细的时域仿真,再从 中挑选存在暂态扭矩放大问题的工况进行研究。限 于篇幅,本文以工况"M电厂单机半载运行,其余电 厂双机半载"为例进行说明。在图1中的3个故障位 置设置不同类型的故障进行仿真,具体设置见表1。

Table 1 Setting of fault simulation			
算例	故障位置	故障类型	边界条件
1		单相瞬时性故障,重合闸	双线单串补
2	F	单相永久性故障	双线双串补
3	r ₁	两相故障	双线双串补
4		三相故障	双线双串补
5		单相瞬时性故障,重合闸	双线单串补
6	F	单相永久性故障	双线双串补
7	F_2	两相故障	双线双串补
8		三相故障	双线双串补
9		单相瞬时性故障,重合闸	双线单串补
10	F	单相永久性故障	双线双串补
11	ľ ₃	两相故障	双线双串补
12		三相故障	双线双串补

表1 故障仿真设置 Table 1 Setting of fault simulation

具体地,F₁处发生单相永久性故障、两相故障、 三相故障后,切除SL站与XM站之间的1回线路;F₂ 或F₃处发生单相永久性故障、两相故障和三相故障 后,切除XM站至BJD站之间的1回线路。根据仿真 计算结果,表1中算例12的故障设置对机组的影响 最大,可在很短的时间内使最薄弱的推力轴承处产生 超过50%的疲劳,值得重点关注;表1中其他算例下 产生的疲劳,或者很小,或者TSR保护可以及时动作。

3.2 转速差及扭矩的波动幅值

从因果关系上看,发电机的电磁扭矩如果出现 波动,将引起发电机组转速波动,波动力矩是引起波 动转速的唯一原因,必定相关。限于篇幅,以表1中 的算例12为例,应用式(1)、(2)计算汽轮发电机侧 转速波动的幅值 $\Delta \omega_{amp}$,采用与式(2)相似的算法计 算HIP与LP之间的扭矩波动的幅值 ΔT_{amp} ,结果如图 4所示。图中 ΔT_{amp} 为标幺值,后同。

进一步地,对表1中的算例1—11进行同样的计算。考察故障初期和第20s前后近似到达稳态时 $\Delta \omega_{amp}$ 的最大值 $\Delta \omega_{amp,max}$ 及其对应时刻 ΔT_{amp} 的最大值 $\Delta T_{amp,max}$,结果如图5所示,详细数据参见附录中的 表A1。

从上述计算结果看,扭矩波动与转速差波动一 致,故障大扰动产生的扭矩波动越大,其转速扭转波 动也就越大,这说明可以借助转速差波动幅值越限 判据反映暂态扭矩放大的事故。但是需要注意的



图4 机头转速差、HIP转子和LP转子之间的扭矩及 两者的幅值(算例12)

Fig.4 Speed deviation in turbo side and shaft torque of HIP-LP and their amplitudes in Case 12



图 5 机头转速差波动幅值与扭矩波动幅值的关系

Fig.5 Curve of $\Delta T_{\text{amp.max}}$ vs. $\Delta \omega_{\text{amp.max}}$

是,由于大轴转子机械系统复杂,暂态扭矩放大又是 一个大扰动、非线性的过渡过程,暂无充足的理由说 明 ΔT_{amp} 和 $\Delta \omega_{amp}$ 呈线性关系。

3.3 保护判据的验证思路

暂态扭矩放大是极危险的事故,现场不具备条件模拟,也不允许模拟。为了进行有效验证,RTDS 数字动模试验是一个不错的办法。但是,RTDS得到 的发电机转速信号太理想,为了更加接近实际,本文 提出的验证思路如下:

(1)通过 PSCAD / EMTDC 电磁暂态软件仿真得 到发电机组大轴转速差 $\Delta \omega_{sinu}$,以及发电机机端的三 相电压、三相电流;

(2)装置实测发电机组稳定运行下的转速信号 ω_{meas} ,扣除额定转速,得到了没有次同步模态扭振但 是包含了"噪声"的转速差 $\Delta\omega_{meas}$;

(3)将 $\Delta \omega_{\text{meas}}$ 和 $\Delta \omega_{\text{simu}}$ 叠加,构造出更加接近实际的转速差信号 $\Delta \omega$;

(4)然后采用本文提出的保护算法进行计算,验 证保护装置的动作行为;

(5)如果保护动作,则将断路器跳闸状态代回仿

真中,计算跳闸后的情况;

(6)校核仿真结果机组扭矩产生的断面疲劳,应 将疲劳控制在一定的安全范围内。

实测多台机组实际正常运行时的转速波形,不同机组、不同时刻经过转速齿码盘实测的瞬时转速虽然各不相同,但是 $\Delta\omega_{meas}$ 在次同步频率段的幅值并不是很大,这为通过转速量实现快速保护提供了有利条件。图6为在现场实测的M电厂的一台发电机组稳定运行时的转速差及其快速傅里叶变换(FFT)频谱分析结果。



图6 M电厂稳定运行时的实测转速差及其 FFT频谱分析结果

Fig.6 Measured rotation speed difference and its FFT results during stable operation in Power Plant M

从图6可见,正常运行时的转速波动量主要包含:①可能由汽机通流"抖动"引起的低次谐波;②由 机组大轴横振引起的工频及其整数次谐波;③受齿 码盘加工精度、转速脉冲上升下降沿"抖动"影响而 产生的高频谐波。下文通过算例验证保护判据时, 在仿真的转速信号中叠加了图6的"恶劣"数据。

3.4 保护计算结果

尝试选用多个定值门槛 $\Delta\omega_{set}$ 及多个延时定值 T_2 进行保护计算,兼顾快速性与可靠性,最终确定 $\Delta\omega_{set}=2.1 \text{ rad / s}, T_2=35 \text{ ms}, 对表1中的12个算例进$ 行计算,结果如表2所示。

由表2可见:对于 ΔT_{amp} <1 p.u.的情况,保护均不动作;除了算例9以外,大部分单相接地故障工况保 护不动作,算例9在重合闸时会产生较大的扭矩振 荡。由于篇幅限制,本文仅展示算例12的时域波形 结果,如图7所示。

按上述保护计算,第2.109 s时保护跳闸出口, 设经过40 ms(保护装置内部小继电器接点闭合、高 压断路器分断的总时间)后,断路器完全断开,代回 仿真系统中再次计算,机组扭矩及推力轴承处的扭 矩疲劳结果如图8所示。

表2 保护计算结果

Table 2 Calculation	results	of	protection
---------------------	---------	----	------------

算例	$\Delta \omega_{ m amp.max}$ / $(m rad \cdot s^{-1})$	$\Delta T_{ m amp.max}$	动作情况	动作 时刻 / s
1	1.244	0.524	不动作	_
2	0.139	0.047	不动作	_
3	2.169	1.086	动作	2.271
4	2.523	1.219	动作	2.269
5	0.812	0.388	不动作	_
6	0.731	0.310	不动作	_
7	1.985	0.884	不动作	_
8	3.289	1.481	动作	2.214
9	2.956	1.217	动作	3.373
10	0.767	0.339	不动作	_
11	3.429	1.680	动作	2.214
12	4.695	2.252	动作	2.109



图 7 算例 12 的保护仿真结果







从上述结果可得出以下结论。

(1)快速保护及时动作解列机组,暂态扭矩振荡 幅度有一定程度的减小,疲劳值不再快速跃升;对比 图 2,同样是故障后的第 0.224 s,此时疲劳值仅为 0.19%,机组得到了有效的保护。

(2)机组解列之后,已经扭振的转子不会立刻停

止扭振,此时机组已经脱网,振荡的模式阻尼时间常数往往比较大(约为40~60s),衰减慢,持续产生疲劳,第20s时,疲劳值已经达到10.91%,这对机组不利;好在扭矩进一步衰减之后,后续的疲劳增长将变得极慢,直至扭矩降至安全幅度以下,疲劳值将停止增长。由此可知,若要进一步降低机组脱网后持续扭振产生的疲劳,对应需要进一步降低保护定值,缩短保护动作时间。

(3)对于图2,如果由TSR保护来动作,由于TSR 保护在大扰动初期扭矩辨识明显偏低,且模态滤波、 疲劳计算等环节会产生一定延迟,TSR保护动作将 在故障发生的0.5 s之后,无法起到有效的保护作 用。此处的快速保护,弥补了这个问题。

由于算例1-11的严重程度要明显低于算例 12,因此不再赘述。本节计算表明快速扭矩保护可 通过转速波动越限反映严重的扭矩振荡,及时跳闸, 避免机组大轴出现严重损伤,达到保护设计的预期。

4 几点讨论

4.1 保护定值整定

保护的灵敏性与可靠性是一对矛盾,保护定值的整定应当有所兼顾,目前尚无整定依据,这里尝试进行探讨。

(1)启动定值:工频变化量的灵敏比较高,暂态 扭矩放大是系统大扰动产生的机网故障,为此可以 适当提高启动定值门槛,本文算例中取为0.20 p.u.。

(2)保护定值:由单一模态频率扭振进行估计, 考虑疲劳计算的不确定性、暂态过程影响、机组解列 后的持续扭振,取一定的可靠系数降低定值,具体说 明如下。

a. 假设出现单一的次同步模态频率扭振,并处 于稳态,则对于M电厂的机组,以主机厂提供的轴系 参数(参见附录B)进行计算,当模态1频率扭振转速 幅值达到10.150 rad/s或者模态2频率扭振转速幅 度达到7.737 rad/s时,一次扭振振荡就可以导致轴 系最薄弱处出现疲劳损坏。

b.疲劳寿命曲线通常是依据材料实验的统计结 果,并根据大量应用的经验进行修正,有一定的不确 定性;此外,当扭应力不是一个单纯的等幅循环应力 时,还需考虑疲劳计算的修正;因此在前述最坏可能 估计的基础上,笔者建议至少要有1倍以上的安全 裕量。

c.暂态扭矩放大是由电网大扰动引起,电容串 补条件下电气谐振频率与机组轴系某一固有模态频 率互补,暂态过程十分复杂,保护动作出口到发电机 解列有几十毫秒的短延时,该时间内振荡的扭矩有 可能进一步升高,保护定值需要考虑裕量。

d. 第3节的分析计算表明, 机组脱网之后仍然 持续扭振, 可以按衰减时间常数为40~60 s进行估 计,估计扭矩下降的程度及对疲劳的影响。

本文由 a — d 经过一些试算后,建议越限门槛可 降至估计值的 1/4,可设为 1.934 rad / s 左右(第 3 节 给出的算例中定值门槛设为 2.1 rad / s)。

(3)延时定值:为可靠起见,不宜瞬时动作,若采 用窗函数计算波动转速幅值,则延时定值至少要略大 于窗长,可取1.1倍的窗长;若采用瞬时峰值检测,则 至少保证连续若干个瞬时值(可取3~5个点)越限。

完整且精细的定值整定方法应依据仿真计算结 果进行整定。首先建立准确的仿真模型,使用准 确的参数,确定所有可能的工况;其次通过频率扫描 法、复转矩系数法等手段筛选出风险较大的工况; 接着对这些工况进行详细的时域仿真,根据仿真结 果,选择若干组定值;最后一一校核。该方法的工作 量极大,对于本文讨论的M电厂,需验证几百种工况。

4.2 应用场合

M电厂提出扭振快速保护技术方案的初期,并 未得到电网公司的认可。根据DL/T 755—2001 《电力系统安全稳定导则》^[10]的"第一级安全稳定标 准"条款:"正常运行方式下的电力系统受到下述单 一元件故障扰动后,……,其它元件不超过规定的事 故过负荷能力,不发生连锁跳闸。"电网公司认为串 补线路上发生故障,对M电厂而言是区外故障、远端 故障,机组不应跳闸,若确实存在严重的扭矩振荡风 险,则串补投运时,M电厂机组应当停机。然而,长 时间停机对M电厂而言损失巨大,难以接受。经过 反复研究及协商,M电厂与电网公司达成如下共识:

(1)XM地区有若干电厂,机组众多,只有M电 厂存在严重的暂态扭矩放大风险,其他电厂不加装 该保护,M电厂机组跳闸,对区域电网的影响不大;

(2)线路故障是小概率事件,其中的两相故障、 三相故障发生的概率更小,发生相对较多的单相接 地故障也往往经过渡电阻接地,因此严重的暂态扭 矩放大事件只是极小概率事件。

最终,电网公司同意M电厂开展快速扭振保护的研究及应用,同时M电厂着手实施阻塞滤波器方案^[11]进行扭振抑制。

5 结论

当汽轮发电机组外送输电通道存在电容串补, 经过技术评估认定存在暂态扭矩放大问题时,除及 时采取合理的扭振抑制方案外,应当加装扭振快速 保护,以应对极端情况。

系统大扰动产生的扭矩波动将引起发电机组转 速波动,仿真算例分析结果表明,波动转速幅值与扭 矩波动幅值一致,基本成正比,因此可以通过波动转 速幅值越限来反映暂态扭矩放大;简化滤波环节并 使用短窗算法等,可以提高保护的快速性;将发电机 电流工频变化量、暂态功率工频变化量的越限作为 本文针对M电厂的机组,通过仿真多个算例,并 在仿真的转速信号中叠加现场实测的转速噪声信 号,按设计的保护算法进行计算,粗略验证了扭振快 速保护方案的可行性。

本文提出保护方案简单易行,但是毕竟是一种 间接地反映扭矩越限的方法。要实现更合理的快速 保护,一方面应设计受滤波器影响较小的扭矩辨识 算法,以提高快速性,另一方面应通过大量仿真充分 验证保护算法、保护逻辑和保护定值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

218

- [1] ANDERSON P M, AGRAWAL B L, VAN NESS J E. Subsynchronous resonance in power systems [M]. New York, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1990:213-255.
- [2] 程时杰,曹一家,江全元.电力系统次同步振荡的理论与方法 [M].北京:科学出版社,2009:339-393.
- [3]谢小荣,韩英铎,郭锡玖. 电力系统次同步谐振的分析与控制 [M]. 北京:科学出版社,2015:342-381.
- [4] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Proposed terms and definitions for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(2): 506-511.
- [5] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Terms, defi-

Fast torsional vibration protection for large steam turbine generator

ZHANG Qixue, MA Zhiheng, XIAO Peng, DU Chenggang, WANG Kai, YANG Yang,

ZHOU Rongbin, WANG Qiang, WANG Guang

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The transient torque amplification which may be resulted from series compensated capacitor could lead to fatigue cracks in the shaft of a large steam turbine generator within 0.5 seconds, the conventional torsional stress relay cannot work in time to protect in this extreme case. A fast protection method is proposed, which takes the over-component of power frequency variation of current or active power as the pick-up criterion, and the over-amplitude of fluctuation speed amplitude as the operation criterion. For the turbine-generator units of the Power Plant M in XM grid of China, twelve cases are selected for time domain simulation study. The simulative results show that the speed deviation amplitudes are obviously consistent with the torsional torque amplitudes and they are approximately proportional. Finally, the speed signals of the simulation cases are superimposed with on-sited measured speed noises, and then the protection algorithm and logic are verified. The study shows the fast protection doesn't operate when torsional vibration is slight, but trips fast when torsional vibration is severe, so that the fatigue value resulted from shaft torque amplification in the worst case will be decreased to less than 15%. It should be noted that the effect of torsional vibration still exists after the generator is disconnected from the grid, and the protection setting threshold should have sufficient margin.

Key words: steam turbine generator; subsynchronous resonance; subsynchronous oscillation; torsional vibration protection; transient shaft torque amplification; series compensated capacitor

nitions and symbols for subsynchronous oscillations [J]. IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1334.

- [6] ANDERSON P M. Power system protection [M]. New York, USA:IEEE Press Series on Power Engineering, 1998:995-998.
- [7] SUN S C, SALOWE S, TAYLOR E R, et al. A subsynchronous oscillation relay-type SSO[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(7): 3580-3589.
- [8] 倪以信、陈寿孙、张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北 京:清华大学出版社,2002:327-329.
- [9] BOWLER C E J, DEMCKO J A, MANKOFF L, et al. The Navajo SMF type subsynchronous resonance relay [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(5): 1489-1495.
- [10] 国家经济贸易委员会.电力系统安全稳定导则:DL/T 755-2001[S].北京:中国电力出版社,2001.
- [11] FARMER R G, SCHWALB A L, KATZ E. Navajo project report on subsynchronous resonance analysis and solutions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96 (4):1226-1232.

nrec.com):

mazh@nrec.com);

置技术服务工作(E-mail:xiaopeng@nrec.com)。

张琦雪(1974—),男,江苏沭阳人,研

马志恒(1990-),女,江苏徐州人,工

肖 鹏(1986—),男,山东潍坊人,助

(编辑 任思思)

究员级高级工程师,博士,从事电厂继电保护

及自动化装置研发工作(E-mail: zhangqx@

程师,硕士,从事电力系统仿真工作(E-mail:

理工程师,从事电厂继电保护及自动化装

作者简介:



附录 A

Table A1 Calculation results of protection				
	故障初期		约 20s 时刻左右	
算例	$\Delta \omega_{ m amp.max}$ /(rad·s ⁻¹)	$\Delta T_{ m amp.max}$	$\Delta \omega_{\text{amp.max}}$ /(rad·s ⁻¹)	$\Delta T_{ m amp.max}$
1	1.244	0.524	0.820	0.356
2	0.139	0.047	0.061	0.026
3	2.169	1.086	1.507	0.810
4	2.523	1.219	1.641	0.863
5	0.812	0.388	0.170	0.080
6	0.731	0.310	0.521	0.231
7	1.985	0.884	0.868	0.435
8	3.289	1.481	1.426	0.721
9	2.956	1.217	2.078	0.873
10	0.767	0.339	0.263	0.146
11	3.429	1.680	1.610	0.848
12	4.695	2.252	2.018	1.052

表 A1 保护计算结果 Table A1 Calculation results of protection

附录 B

M 电厂发电机组主要参数如下。

(1) 发电机主要参数。

额定功率 P_n =350MW; 额定功率因数 cos(φ_n)=0.85; 额定电压 U_n =20kV; 同步电抗 X_d = X_q =217%; 瞬变电抗 X'_d =27.73%, X'_q =38.63%; 超瞬变电抗 X''_d = X''_q =19.03%; 额定转速 ω_n =3000rpm。

(2) 轴系参数如表 B1 所示。

表 B1 大轴转动惯量和扭转刚度

Table B1Shaft inertias	and spring constants
------------------------	----------------------

质块	分缸功率/%	等效惯量/kg·m ²	等效扭转刚度/(N·m·rad ⁻¹)
HIP	71.9	3392	HIP-LP: 9.153×10 ⁷
LP	28.1	18915	LP-GEN: 1.186×10 ⁸
GEN		7431.3	

(3) 固有模态频率。

模态1频率为22.36Hz,模态2频率为29.54Hz。

(4) 主变压器参数。

额定容量 S_n =450Mvar; 电压变比为 550kV-2×2.5%/20kV; 短路压降 U_k =14%; 绕组连接方式为 Yn, d11。

(5) 大轴上部分危险断面疲劳寿命曲线如图 B1 所示。



图 B1 疲劳寿命曲线

Table B1 Fatigue strain-life curves