

发电电动机励磁绕组匝间短路故障在线监测

孙宇光¹,王炳辉¹,徐 伟²,蒋程晟²

(1. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084;

2. 华东宜兴抽水蓄能有限公司,江苏 宜兴 214205)

摘要: 通用的励磁绕组匝间短路故障在线监测方法未加分辨地采用定子中性点不平衡电流中的所有分数次谐波分量构成监测量及相应的报警值,可能因报警值较高而对小匝数故障不够灵敏。以江苏宜兴抽水蓄能电站发电电动机为例,计算小匝数励磁绕组匝间短路故障引起的定子中性点不平衡电流并实测正常工况下固有不平衡电流,在此基础上提出了一种改进的在线监测方案,提取由匝间短路引起的不平衡电流中含量较高的 3/8 次和 5/8 次谐波电流构成报警值。仿真计算结果表明,对于江苏宜兴抽水蓄能电站发电电动机,改进的在线监测方案能对 3% 及以上匝比的励磁绕组匝间短路故障发出警报,灵敏性优于通用监测方案。基于所提改进方案的在线监测装置已经成功投运于江苏宜兴抽水蓄能电站 4 号发电电动机。

关键词: 发电电动机; 继电保护; 横差保护; 励磁绕组匝间短路; 在线监测; 谐波分析

中图分类号: TM 31; TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.033

0 引言

从 20 世纪 90 年代开始,我国抽水蓄能电站进入了快速发展时期。与一般水轮发电机相比,抽水蓄能电站的发电电动机运行工况更复杂、运行环境更恶劣。随着机组运行年限的增长,出现过一些发电电动机事故和故障,其安全稳定问题值得关注^[1-3]。比如励磁绕组匝间绝缘在高速、频繁启动的发电电动机中更容易磨损,造成转子励磁绕组匝间短路故障的发生概率比一般水轮发电机更高。

尽管轻微的励磁绕组匝间短路故障不会对同步电机产生严重影响,但如果电机长期带故障运行很可能造成短路匝数增大、故障程度加深,引起励磁电流显著增加、输出无功功率减小、机组振动加剧,短路点处的局部过热还可能使故障演化为转子一点甚至两点接地故障,损坏转子铁芯并可能导致转子大轴磁化,严重情况下还会烧伤轴颈和轴瓦,给机组的安全运行带来巨大威胁^[4-5]。考虑到励磁绕组匝间短路的种种潜在危险,如果能在发电电动机运行中对这种故障进行在线监测,及时发现处于萌芽期的小匝数故障,监视其发展并确定是否需要检修,就能避免轻微的故障恶化为严重的匝间短路或转子接地故障,这对保障发电电动机及电网系统的安全运行具有重要的意义。

近年来国内外学者对励磁绕组匝间短路故障的在线监测原理及方法进行了大量的研究,提出了检测磁场变化的探测线圈法^[6-7]、利用机组振动特性^[5,8]

和轴电压^[9]的辅助判据以及基于电机电气量^[10-14]的多种在线监测方法等,目前只有电气量监测方法比较适用于电机的实际运行现场。本文以江苏宜兴抽水蓄能电站发电电动机(以下简称宜兴发电电动机)为例,在对小匝数励磁绕组匝间短路故障引起的电流变化进行定量计算和特征分析的基础上,结合现有主保护配置和发电电动机在实际正常运行中的固有不平衡电流的特点,为一种通用的故障在线监测方案^[14]设定了合理的报警值,分析了该方案对小匝数故障灵敏性欠佳的原因,并为宜兴发电电动机提出了一种灵敏性更高的改进方案,将其应用于在线监测装置中。

1 中性点电流互感器对励磁绕组匝间短路故障的反映

近年来的研究表明,在多分支的同步发电机中,励磁绕组匝间短路故障所引起的定子相绕组内部各分支之间的不平衡电流,往往能够反映在发电机主保护所配置的电流互感器中,可由此提取故障特征,进行励磁绕组匝间短路故障的在线监测^[15]。

研究发电电动机利用现有主保护硬件配置对发电电动机进行在线监测,首先必须分析清楚各种电流互感器能够反映励磁绕组匝间短路的哪些故障特征。以宜兴发电电动机为例,其定子绕组每相 4 个分支,目前有 2 套主保护,即完全纵差保护和零序电流型横差保护,其中后者是在相邻支路分组的中性点引出方式下配置的,如图 1 所示。

励磁绕组匝间短路故障引起的同相并联分支间的不平衡电流,其频率一般不同于正常工况下的定子电流频率(即电网频率 f_0),稳态谐波特征与电机的极对数、定子绕组的分布及联接方式等因素密切相

收稿日期:2016-01-29;修回日期:2016-07-06

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51277103)

Project supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China(51277103)

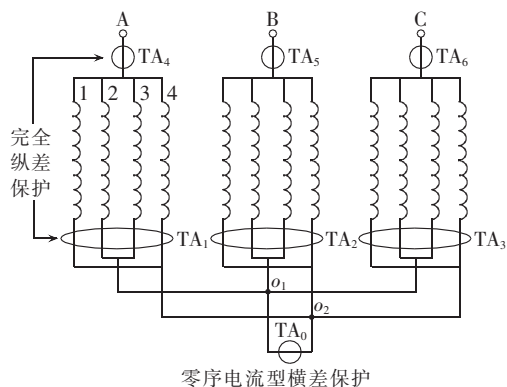


图 1 宜兴发电电动机现有主保护及电流互感器配置示意图

Fig.1 Configuration of main protections and current transformers for Yixing generator/motor

关^[15]。宜兴发电电动机的极对数 $p=8$, 额定转速 $n_N=375 \text{ r/min}$; 定子绕组采用双层短距的叠绕组形式, 线圈数 $Z=264$, 每相并联分支数 $n=4$, 每分支由相邻 4 (即 $2p/n$) 极下对应相带的极相组串联而成。由于每极每相线圈数 $q=11/2$, 相邻两极下的对应相带所含线圈数不等, 比如图 2 所示的 A 相绕组第 1 分支 (首端 A_1 、末端 X_1) 中, 在相邻 4 极下分别包含 6 个正绕 (+A)、5 个反绕 (-A)、6 个正绕 (+A) 和 5 个反绕 (-A) 的串联线圈。从图 2 可以看到, A 相其他 3 个分支的空间分布及联接方式也具有相似特点, 4 个分支在空间上依次互差 90° 的机械角度, 所以 A 相所有并联支路在空间上具有对称性。宜兴发电电动机定子 B、C 相绕组也具有同样的特点, 在此不再赘述。

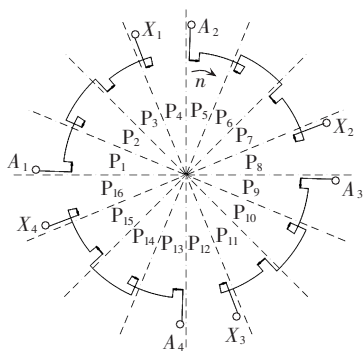


图 2 宜兴发电电动机定子 A 相绕组分布与连接示意图

Fig.2 Distribution and connection of phase-A stator windings of Yixing generator/motor

文献^[16]中分析了宜兴发电电动机励磁绕组匝间短路故障产生的 $1/8$ 次 (及类似的 $3/8$ 次、 $5/8$ 次等)、 $2/8$ 次 (及类似的 $6/8$ 次、 $10/8$ 次等) 和 $4/8$ 次 (及类似的 $12/8$ 次、 $20/8$ 次等) 空间谐波的气隙磁场在同相 4 个并联分支中引起的感应电动势的不同特点, 论证了定子各分支会产生 $1/8$ 次、 $2/8$ 次、 $3/8$ 次、 $5/8$ 次等 (即除 $4k/8 (k=1, 2, \dots)$ 次谐波以外的) 分数次谐波电流的励磁绕组匝间短路故障特征。每种

分数次谐波电流在宜兴发电电动机的同相 4 个分支中大小相等但相位不同, 造成了同相内部各分支电流 (瞬时值) 的不平衡性; 而且 (理论上) 其和为 0, 不会出现在相电流中。在同相两相邻分支 (比如 a_1 与 a_4) 中, $2/8$ 次、 $6/8$ 次等分数次谐波电流的瞬时值大小相等而方向相反; 但在同相两相隔分支 (比如 a_1 与 a_3 分支) 中, $1/8$ 次、 $3/8$ 次、 $5/8$ 次等分数次谐波电流的瞬时值大小相等而方向相反。

励磁绕组匝间短路在宜兴发电电动机定子绕组中引起的上述故障特征, 显然无法反映在相电流互感器 ($TA_1—TA_6$) 中。而进入中性点间电流互感器 TA_0 的电流为三相中相邻两分支的电流之和, 即: $i_{0/02} = i_{a1} + i_{a4} + i_{b1} + i_{b4} + i_{c1} + i_{c4} = -(i_{a2} + i_{a3} + i_{b2} + i_{b3} + i_{c2} + i_{c3})$, 其中, $i_{0/02}$ 为进入 TA_0 的电流; $i_{a1}—i_{a4}$ 、 $i_{b1}—i_{b4}$ 、 $i_{c1}—i_{c4}$ 分别为 A 相、B 相、C 相绕组各分支的电流。

由于同相两相邻分支的 $2/8$ 次、 $6/8$ 次等分数次谐波电流之和为 0, (理论上) 只有 $1/8$ 次、 $3/8$ 次、 $5/8$ 次等分数次谐波电流会出现在 TA_0 中。

2 基于中性点不平衡电流的发电电动机励磁绕组匝间短路故障在线监测通用方案

大型发电机及发电电动机所配置的主保护, 主要是起到对定子内部短路故障进行快速反应, 从而尽快切除故障的作用, 因为这类定子故障引起的持续性短路电流和电磁力会对电机造成严重破坏。比如提取中性点不平衡电流的零序电流型横差保护 (参见图 1), 在电机正常运行及各种机端外部短路故障 (比如两相短路的故障) 中, 由于同相内部各分支电流都相同, 不平衡电流的理论值为 0; 而定子内部短路故障会引起包含基波及 3 次、5 次等奇数次谐波的不平衡电流, 当进入电流互感器的基波不平衡电流超出保护整定值 (目前的主保护取基波分量作为动作量) 时, 零序电流型横差保护就会快速动作^[17-18]。

通过第 1 节的分析可知, 励磁绕组匝间短路也会在发电 (电动) 机中性点间引起不平衡电流, 而且理论上这些不平衡电流中没有基波及 3 次、5 次等奇数次谐波, 只有特定次数的分数次谐波, 比如在宜兴发电电动机中性点间的 $\mu = (2k+1)/8 (k \text{ 为整数})$ 次谐波电流。已有的研究表明, 常见的电机电气故障中, 机端外部故障不会引起同相不同分支间的不平衡电流, 定子内部短路和转子静偏心故障引起的不平衡电流中只有基波及较小的 3 次、5 次等奇数次谐波, 所以中性点不平衡电流中的分数次谐波是励磁绕组匝间短路所独有的故障特征^[12-16], 可以利用其构成该故障的在线监测方案。

从前文的分析过程也可看到, 励磁绕组匝间短

路故障会引起哪些分数次谐波的不平衡电流,主要由极对数、多分支定子绕组的分布与连接方式、中性点引出方式等因素决定,在不同的电机中会呈现出不同的特点。事实上通过对宜兴发电电动机及其他多台水轮发电机的励磁绕组故障特征分析可以推断,多对极、多分支发电机(以及发电电动机)中性点间不平衡电流的所有分数次谐波,都是励磁绕组匝间短路故障的独有故障特征量(在其他故障中不会出现)。文献[12]提出了一种基于主保护不平衡电流总有效值的励磁绕组匝间短路故障监测方法,能适用于具有不同谐波故障特征的发电机中。考虑到由制造及安装误差等原因引起的电机正常运行(以及机端外部故障)时实际存在的固有不平衡电流,在监测方案中还必须设定一个合理的报警值。一般而言,所设的报警值越小,在线监测越灵敏,但报警值应大于正常运行情况下由电机固有不平衡电流引起的监测量。文献[14]进一步考虑到发电机正常运行时以基波及奇数次谐波为主的固有不平衡电流的影响,从不平衡电流总有效值中再剔除基波及3次、5次等奇数次谐波而构成监测量,能在保证监测可靠性的前提下降低报警值、提高监测灵敏性。另一方面,主保护不平衡电流的基波及少量3次、5次等奇数次谐波,理论上是定子内部短路及转子静偏心的故障特征量,而在励磁绕组匝间短路故障中不会出现。所以文献[14]的监测方法从原理上讲更合理,可作为一种通用的励磁绕组匝间短路故障在线监测方法,能适用于大多数发电(电动)机。

2.1 监测量

在这种通用的励磁绕组匝间短路故障在线监测方法中,监测量可由式(1)计算。

$$I_{op} = \sqrt{\frac{f_0}{p} \int_0^{p/f_0} i^2 dt - \sum_{k=1,3,5,\dots} I_k^2} \quad (1)$$

其中, f_0 为基波频率,即为定子相电流频率,对于我国电网而言, $f_0 = 50$ Hz; i 为中性点不平衡电流 $i_{o\phi 2}$ 的瞬时值; I_k 为不平衡电流中 k 次谐波的有效值(可由傅里叶算法得到)。一般而言,5次及以上的定子电流谐波比较小,所以式(1)中 k 可取 1、3。

2.2 报警值

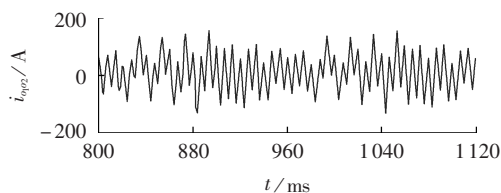
可靠的在线监测,其报警值应保证大于实际正常运行(及机端外部故障)时固有不平衡电流所引起的监测量的最大可能值。下面以宜兴发电电动机为例进行说明。

宜兴发电电动机的额定电压 $U_N = 15.75$ kV, 额定电流 $I_{Ng} = 10191$ A、 $I_{Nm} = 10411$ A(下标 g、m 分别对应发电和电动机工况,后同),额定功率因数 $\cos \varphi_{Ng} = 0.9$ 、 $\cos \varphi_{Nm} = 0.98$,额定励磁电流 $I_{fNg} = 1816$ A、 $I_{fNm} = 1655$ A。图3是宜兴电站4号发电电动机正常运行

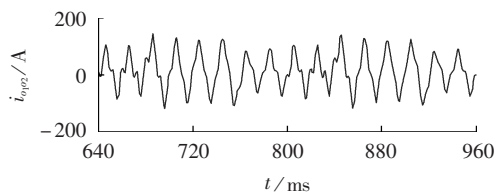
在3种典型工况,即发电工况、抽水调相工况和抽水工况下时,中性点不平衡电流的现场录波图。可以看到,这3种正常运行工况下的中性点固有不平衡电流的周期都为 160 ms,其中含有明显的分数次谐波电流(极对数 $p=8$)。通过对稳态录波数据的傅里叶级数分解,可计算出其所含的基波和各种谐波成分的有效值,并根据式(1)计算出正常工况下实际监测量

的大小,计算结果见表1。表中, $I_{ms} = \sqrt{\frac{f_0}{p} \int_0^{p/f_0} i^2 dt}$

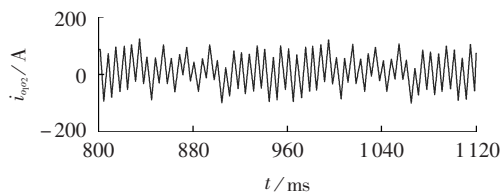
为总有效值; $I_{op,nor} = \sqrt{I_{ms}^2 - (I_1^2 + I_3^2)}$ 为正常运行时的实际监测量;工况①指发电工况(励磁电流录波数据为 1314.9 A),工况②指抽水调相工况(励磁电流录波数据为 1051.8 A),工况③指抽水工况(励磁电流录波数据为 1554.34 A),后同。需要说明的是,本文的中性点电流实验数据和计算结果、监测量和报警值都指电流互感器 TA_0 一次侧值。



(a) 发电工况(励磁电流 $I_{fd} = 1314.9$ A)



(b) 抽水调相工况(励磁电流 $I_{fd} = 1051.8$ A)



(c) 抽水工况(励磁电流 $I_{fd} = 1554.34$ A)

图3 宜兴发电电动机4号机在3种典型工况下的中性点固有不平衡电流录波图

Fig.3 Recorded waveforms of inherent imbalanced neutral-point current of Yixing generator/motor No.4 for three typical operating conditions

一般而言,电机固有不平衡电流的大小与励磁电流近似成正比,可以认为其中各种谐波分量的大小也近似与励磁电流成正比。表1中,抽水调相工况引起的监测量($I_{op,nor} = 22.07$ A)与励磁电流(直流分量 $I_{fd} = 1051.8$ A)的比值最大,可据此估算正常运行工况下的最大不平衡电流,并设定实际运行工况下一般与励磁电流直流分量 I_{fd} 成正比的监测报警值为:

表 1 宜兴发电电动机 4 号机在正常稳态运行工况下的中性点固有不平衡电流的谐波分析结果

Table 1 Results of harmonic analysis for inherent imbalanced neutral-point current of Yixing generator/motor No.4 in normal steady-state operating condition

谐波次数	谐波分量有效值/A		
	工况①	工况②	工况③
1/8	6.05	3.53	6.85
2/8	0.27	0.12	0.26
3/8	6.78	5.60	7.62
4/8	0.11	0.14	0.11
5/8	7.54	9.34	8.35
6/8	0.18	0.21	0.19
7/8	10.95	9.21	7.67
基波	25.47	54.76	15.88
9/8	10.41	5.96	4.28
10/8	0.17	0.09	0.24
11/8	2.57	3.02	2.67
⋮	⋮	⋮	⋮
22/8	0.17	0.05	0.34
23/8	11.61	7.42	11.93
3	49.52	14.97	48.49
25/8	9.97	6.32	0.53
26/8	0.24	0.06	0.62
⋮	⋮	⋮	⋮
I_{rms}/A	62.04	60.91	56.06
$I_{op,nor}/A$	27.35	22.07	23.22

$$I_{alarm}=K_{tol}I_{op,nor}\times\max\left(1,\frac{I_{fd}}{I_{fd,nor}}\right)=$$
$$2\times22.07\times\max\left(1,\frac{I_{fd}}{1051.8}\right)\quad(2)$$

其中, I_{fd} 为在线监测的励磁电流直流分量实时值, 当 $I_{fd}>1051.8\text{ A}$ 时, 按式(2)可估算出所监测工况下与励磁电流成正比的正常固有不平衡电流的最大可能值, 而当 $I_{fd}\leqslant1051.8\text{ A}$ 时, 所监测工况下的正常固有不平衡电流不会超过抽水调相工况的正常固有不平衡电流; K_{tol} 为可靠裕度, 一般 $1.2<K_{tol}<3$, 本文中 $K_{tol}=2$ 。

2.3 对小匝比励磁绕组匝间短路故障的灵敏性分析

根据预先实测的发电电动机在正常工况下的固有不平衡电流, 在实时监测中按式(1)计算出监测量 I_{op} 和按式(2)计算出报警值 I_{alarm} 后, 当 $I_{op}>I_{alarm}$ 时在线监测装置将发出励磁绕组匝间短路的故障警报。

目前还无法在实际运行的大型发电(电动)机上实施励磁绕组匝间短路故障实验来检验在线监测方案及装置的灵敏性。近年来对同步发电机励磁绕组匝间短路故障的理论研究取得了一些进展, 已经基本解决了定量计算故障电气量的难题^[13-19], 并通过了多种实验验证。本文以宜兴发电电动机为例, 采用多回路数学模型计算小匝比的励磁绕组匝间短路故障, 并根据仿真结果来分析这种通用在线监测方法的灵敏性。

在联网额定发电工况和额定电动 2 种工况下, 本文计算了宜兴发电电动机发生匝比为 1.1%、2.1%、3.0%、4.0% 的励磁绕组匝间短路故障后的定、转子电流(计算中没有考虑励磁调节器的作用, 励磁电源与正常运行时保持一致), 并进一步计算出进入中性点的不平衡电流。为节省篇幅, 表 2、3 只分别列出了短接线电阻为 $0.1\text{ }\Omega$ 时, 联网发电工况下励磁电流和中性点电流的计算结果。该工况下(故障前)的励磁电流为 1816 A , 大于 1051.8 A , 根据式(2), 相应的监测报警值应与(故障后)励磁电流直流分量 I_{fd} 成正比, 即 $I_{alarm}=2\times22.07\times\frac{I_{fd}}{1051.8}=0.04197\text{ }I_{fd}$ 。

表 2 励磁电流计算结果
Table 2 Calculative harmonic components of excitation current

励磁电流分量	励磁电流分量有效值/A			
	$r_1=1.1\%$	$r_1=2.1\%$	$r_1=3.0\%$	$r_1=4.0\%$
4/8 次谐波	0.012	0.051	0.110	0.189
基波	0.015	0.054	0.113	0.194
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

注: r_1 为励磁绕组匝间短路的短路匝比, r_1 为 1.1%、2.1%、3.0%、4.0% 时, 对应的 I_{fd} 分别为 1816 A 、 1817 A 、 1818 A 、 1819 A , 后同。

表 3 中性点不平衡电流计算结果
Table 3 Calculative harmonic components of imbalanced neutral-point current

谐波分量次数	谐波分量有效值/A			
	$r_1=1.1\%$	$r_1=2.1\%$	$r_1=3.0\%$	$r_1=4.0\%$
1/8	5.67	19.05	39.98	68.29
3/8	4.71	15.78	33.09	56.50
5/8	4.40	14.82	31.12	53.17
7/8	0.90	3.17	6.69	11.44
9/8	0.74	2.67	5.67	9.71
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
23/8	0.73	2.41	5.04	8.61
25/8	0.91	3.02	6.33	10.82
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
I_{op}/A	8.82	29.68	62.31	106.43
I_{alarm}/A	76.22	76.25	76.29	76.34

从表 2、3 可见, 按照式(1)的在线监测通用方案^[14], 宜兴发电电动机假如发生 4% 及以上匝比的励磁绕组匝间短路故障(接近金属性短路)时, 监测量 I_{op} 会超出报警值 I_{alarm} , 在线监测装置会发出故障警报。另外联网额定电动工况的计算结果也反映了类似的监测灵敏性。

3 改进的宜兴发电电动机在线监测灵敏方案

从表 2、3 的仿真结果可见, 励磁绕组匝间短路故障在宜兴发电电动机引起的中性点不平衡电流中, 1/8 次、3/8 次和 5/8 次谐波分量的含量最高。对比表 1 与表 2、3 可以发现, 宜兴(4 号)发电电动机在抽水调相工况下正常运行时, 中性点固有不平衡

电流中最大的分量是基波和 3 次谐波,同时存在较明显的 7/8 次、9/8 次、23/8 次和 25/8 次谐波,但小匝比励磁绕组匝间短路故障引起的这 4 种分数次谐波的仿真值并不大。

根据宜兴发电电动机的中性点固有不平衡电流和小匝数励磁绕组匝间短路所引起的不平衡电流的特点,可以只提取故障引起的不平衡电流中几种有效值最大的分数次谐波,构成另一种监测方案。由于宜兴发电电动机配置的中性点电流互感器 TA₀ 是 5P20 型,这种 P 级互感器在设计中主要考虑工频稳态电流引起的铁芯饱和对传变误差的影响(现有主保护主要以基波电流为动作依据),而不考虑过渡过程中非周期分量引起的饱和影响,所以对低频分量的传变误差很大,一般对 10 Hz 以下的交流分量无法保证准确传变^[18,20]。本文只提取频率分别为 18.75 Hz 和 31.25 Hz 的 3/8 次和 5/8 次谐波,并取其总有

效值构成监测量,即:

$$I'_{op} = \sqrt{I_{3/8}^2 + I_{5/8}^2} \tag{3}$$

针对式(3)所示的改进方案,报警值 I'_{alarm} 也必须保证大于正常运行的最大不平衡电流引起的监测量 I'_{op} 。利用 2.2 节中的宜兴发电电动机在 3 种正常工况下的中性点固有不平衡电流,可得到改进方案对这 3 种正常工况的监测量大小,如表 4 所示。

表 4 改进在线监测方案对宜兴发电电动机 4 号机实际正常运行工况的监测量

Table 4 Measurements of improved online monitoring scheme for Yixing generator/motor No.4 in normal operating condition

谐波次数	谐波分量有效值/A		
	工况①	工况②	工况③
3/8	6.78	5.60	7.62
5/8	7.54	9.34	8.35
$I'_{op,nor}/A$	10.14	10.89	11.30

在表 4 中,抽水调相工况下的监测量为 10.89 A,与励磁电流 1051.8 A 的比值最大,如 2.2 节所述,可据此设定实际运行工况下与励磁电流直流分量 I_{fd} 成正比的改进方案报警值为:

$$I'_{alarm} = K_{tol} I'_{op,nor} \times \max \left(1, \frac{I_{fd}}{I_{fd,nor}} \right) = 2 \times 10.89 \times \max \left(1, \frac{I_{fd}}{1051.8} \right) \tag{4}$$

其中,可靠裕度 K_{tol} 仍取为 2。

根据表 3 计算的宜兴发电电动机发生较小匝数励磁绕组匝间短路故障后的中性点不平衡电流,可根据式(3)计算出改进方案所能提取的故障监测量和根据式(4)计算出报警值,如表 5 所示。从表 5 可见,改进的在线监测方案能够对宜兴发电电动机 3% 及以上匝比的励磁绕组匝间短路故障(接近金属性

表 5 改进在线监测方案的计算结果
Table 5 Calculative results by improved online monitoring scheme

谐波分量次数	谐波分量有效值/A			
	$r_1=1.1\%$	$r_1=2.1\%$	$r_1=3.0\%$	$r_1=4.0\%$
3/8	4.71	15.78	33.09	56.50
5/8	4.40	14.82	31.12	53.17
I'_{op}/A	6.44	21.64	45.42	77.58
I'_{alarm}/A	37.60	37.63	37.65	37.67

短路)发出警报。

与通用监测方案相比,改进方案对宜兴发电电动机小匝数励磁绕组匝间短路故障更加灵敏,这主要是因为改进方案摒弃了 7/8、9/8 次这 2 种频率最接近基波和 23/8 次、25/8 次这 2 种频率最接近 3 次谐波的分数次谐波不平衡电流,从而能够极大地降低监测报警值,而故障所引起的监测量下降幅度并不大,所以改进方案能够在通用方案的基础上进一步提高监测灵敏性。当然灵敏的在线监测改进方案的具体构成方式,与电机极对数、定子绕组结构、中性点引出方式及固有不平衡电流特点等因素都有关系。以宜兴发电电动机为例,假如其现有主保护采用了相隔分支组合的中性点引出方式,那么励磁绕组匝间短路故障将引起 2/8 次、6/8 次等分数次谐波的中性点不平衡电流,式(3)、(4)所示的改进监测方案将无法适用。

另一方面,对比表 1 与表 2、3 会发现,在宜兴电站 4 号发电电动机正常运行时的中性点固有不平衡电流中,3/8 次、5/8 次等大多数分数次谐波分量,比励磁绕组发生匝比为 1% 的匝间短路故障引起的不平衡电流中相应分量的计算值更大,所以无论提取中性点不平衡电流中的哪些谐波构成监测量,都很难反映宜兴发电电动机 1% 及以下匝比的小匝数励磁绕组匝间短路故障。小匝数励磁绕组匝间短路故障的监测灵敏性受到电机(及电流互感器)的中性点固有不平衡电流大小的制约,是基于定子不平衡电流原理的励磁绕组匝间短路故障在线监测方法的局限性之一。

基于上述改进方案的在线监测装置已经投运于宜兴电站 4 号发电电动机,这在国内外抽水蓄能电站中尚属首次。目前这套励磁绕组匝间短路故障在线监测装置运行正常,为宜兴电站发电电动机的安全运行提供了更充分的保障。

4 结论

本文以宜兴发电电动机为例,在对小匝数励磁绕组匝间短路故障进行定量计算的基础上,分析了通用故障在线监测方案灵敏性欠佳的原因。针对宜兴发电电动机的故障特征和固有不平衡电流特点,提

出了一种灵敏性更高的改进监测方案,并将其应用于在线监测装置中。

a. 通用在线监测方案中,未加分辨地用定子中性点不平衡电流中的所有分数次谐波构成监测量及相应的报警值,可能因报警值较高而对小匝数故障不够灵敏。

b. 根据宜兴发电电动机励磁绕组匝间短路故障引起的定子故障电流特点,提出了一种由短路前后变化最明显的某些分数次谐波(3/8次和5/8次谐波)不平衡电流构成的在线监测改进方案。仿真计算表明,该改进方案能对宜兴发电电动机3%及以上匝比的励磁绕组匝间短路故障(接近金属性短路)发出警报,灵敏性优于通用监测方案。

c. 在不同的发电电动机上,可以根据励磁绕组匝间短路故障特征量和固有不平衡电流的特点提出不同的在线监测改进方案,对小匝数故障会比通用监测方案更灵敏。

参考文献:

- [1] 张军,万秋兰,徐贤. 抽水蓄能机组在水泵运行时机组的功率振荡问题及仿真分析[J]. 电力自动化设备,2005,25(10):93-95.
ZHANG Jun,WAN Qiulan,XU Xian. Simulative analysis of pumped-storage generator unit power oscillation at pumping mode[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(10):93-95.
- [2] 陈俊,王其敏,王瑞生,等. RCS-985R/S 微机发电机保护在岗南抽水蓄能机组上的应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(11):75-78.
CHEN Jun,WANG Qimin,WANG Ruisheng,et al. Application of RCS-985R/S microcomputer-based generator protection in pumped storage generator set[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(11):75-78.
- [3] 魏炳漳,姬长青. 高速大容量发电电动机转子的稳定性——惠州抽水蓄能电站 1 号机转子磁极事故的教训[J]. 水力发电,2010,36(9):57-60.
WEI Bingzhang,JI Changqing. Study on rotor operation stability of high-speed large-capacity generator-motor;the accident of potior pole in Huizhou pumped-storage power station[J]. Water Power,2010,36(9):57-60.
- [4] ROSENBERG L T. Influence of shorted turns on thermal unbalance in large generators[C]//Proceedings of the PES Summer Meeting. Los Angeles,USA:IEEE,1978:587-595.
- [5] HUANG Haizhou,ZHANG Kanjun,ZHANG Yong. Detection of turbine generator field winding serious inter-turn short circuit based on the rotor vibration feature[C]//Proceedings of the 44th Universities Power Engineering Conference. Glasgow,England:IET,2009:1-5.
- [6] WOOD J W,HINDMARCH R T. Rotor winding short detection[J]. IEE Proceedings B,1986,133(3):181-189.
- [7] RAMÍREZ-NIÑO J,GARCÍA A,ROBLES E,et al. A mathematical method for improving the detecting of interturn short circuits in rotor windings of power generators[J]. Measurement Science and Technology,2001,12(2):213-219.
- [8] 张征平,刘石. 大型汽轮发电机转子匝间短路故障在线诊断方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):148-152.
ZHANG Zhengping,LIU Shi. Online diagnosis of interturn short circuit for large turbine generator's rotor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):148-152.
- [9] 李和明,武玉才,李永刚. 转子绕组匝间短路对电机轴电压的影响[J]. 中国电机工程学报,2009,29(36):96-100.
LI Heming,WU Yucai,LI Yonggang. Influence of rotor windings inter-turn short circuit fault on electric machine shaft voltage[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(36):96-100.
- [10] 李永刚,宋欣羽,武玉才. 基于多回路理论的转子匝间短路时定子并联支路环流分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(17):71-75.
LI Yonggang,SONG Xinyu,WU Yucai. Characteristic analysis of current in generator stator parallel branches when inter turn short circuit of rotor windings occurs based on multi-loop theory[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(17):71-75.
- [11] 张超,夏立,吴正国,等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征规律分析[J]. 高电压技术,2010,36(6):1506-1512.
ZHANG Chao,XIA Li,WU Zhengguo,et al. Analysis on fault characteristics law of interturn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. High Voltage Engineering,2010,36(6):1506-1512.
- [12] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等. 基于主保护不平衡电流有效值的转子匝间短路故障监测[J]. 电力系统自动化,2011,35(13):83-87,107.
HAO Liangliang,SUN Yuguang,QIU Arui,et al. Monitoring of field winding inter-turn short circuit based on unbalanced current effective value in main protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(13):83-87,107.
- [13] HAO Liangliang,SUN Yuguang,QIU Arui,et al. Steady-state calculation and online monitoring of interturn short circuit of field windings in synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(1):128-138.
- [14] 郝亮亮,吴俊勇,孙宇光,等. 同步发电机转子匝间短路故障监测方案及其灵敏性分析[J]. 电力系统自动化,2013,27(12):120-126.
HAO Liangliang,WU Junyong,SUN Yuguang,et al. A monitoring scheme for inter-turn short circuit of field windings in synchronous machines and its sensitivity anslysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,27(12):120-126.
- [15] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等. 大型水轮发电机励磁绕组匝间短路的稳态故障特征分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):40-45.
HAO Liangliang,SUN Yuguang,QIU Arui,et al. The steady-state fault characteristics of large hydro-generator with inter-turn short circuit of field windings[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(4):40-45.
- [16] 孟繁聪,王霆,孙宇光,等. 宜兴发电电动机转子匝间短路故障的电气特征分析[J]. 大电机技术,2015,45(6):1-5,23.
MENG Fancong,WANG Ting,SUN Yuguang,et al. Electrical characteristics of field winding inter-turn short circuit fault on Yixing generator-motor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic

- Turbine,2015,45(6):1-5,23.
- [17] 桂林,王维俭,孙宇光,等.大中型发电机主保护配置方案量化及优化设计的重要性[J].电力自动化设备,2004,24(10):1-6.
- GUI Lin,WANG Weijian,SUN Yuguang,et al. Importance of quantitative and optimum design of main protection configuration scheme for large and medium generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(10):1-6.
- [18] 桂林,王祥珩,孙宇光,等.向家坝和溪洛渡水电站发电机主保护设计总结[J].电力自动化设备,2010,30(7):30-33.
- GUI Lin,WANG Xiangheng,SUN Yuguang,et al. Summary of main protection design for hydro-generators of Xiangjiaba power station and Xiluodu power station[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):30-33.
- [19] 孙宇光,郝亮亮,王祥珩.同步发电机励磁绕组匝间短路的数学模型与故障特征[J].电力系统自动化,2011,35(6):45-50.
- SUN Yuguang,HAO Liangliang,WANG Xiangheng. Math model

and fault characteristics of field winding inter-turn short circuit of synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):45-50.

- [20] 吴聚业.大型发电机组保护用TPY级电流互感器的研究与应用[J].电力设备,2005,6(1):22-25.

WU Juye. Development and application of TPY current transformer for protection of large generator unit[J]. Electrical Equipment,2005,6(1):22-25.

作者简介:



孙宇光(1975—),女,江苏泰兴人,副教授,博士,主要研究方向为电机故障分析与监测保护(E-mail:sunyuguang98@mails.tsinghua.edu.cn)。

Online monitoring of excitation winding inter-turn short circuit of generator/motor

SUN Yuguang¹,WANG Binghui¹,XU Wei²,JIANG Chengsheng²

- (1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments,
Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;
2. East China Yixing Pumped Storage Power Co.,Ltd.,Yixing 214205,China)

Abstract: As the general schemes of online excitation winding inter-turn short circuit monitoring take all the fractional harmonic components of imbalanced stator neutral-point current as the monitoring variables to form the corresponding alarm threshold,they are not sensitive enough to the short circuit across a few turns due to the higher alarm threshold. With the generator/motor of Yixing pumped storage power station as an example,the imbalanced stator neutral-point current caused by the short circuit across a few turns of excitation winding is calculated,the inherent imbalanced stator neutral-point current in normal operating condition is measured,and an improved online monitoring scheme is proposed,which only adopts bigger harmonic components,i.e. three-eighths and five-eighths harmonic components,to form the alarm threshold. Simulative results show that,with higher sensitivity than the general schemes,the improved scheme issues alarm for the excitation winding inter-turn short circuit of 3% turn-ratio and above. The online monitoring equipment based on the improved scheme for generator/motor No.4 of Yixing pumped storage power station has been successfully put into operation.

Key words: generator/motor; relay protection; transverse differential protection; excitation winding inter-turn short circuit; online monitoring; harmonic analysis