

基于无功相对偏差的无刷励磁发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据

沈利平¹, 马明晗², 李永清¹, 马春泉¹, 冯雪萍¹

(1. 国家电网甘肃省电力公司 刘家峡水电厂, 甘肃 永靖 731600;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了寻找在线识别无刷励磁同步发电机转子匝间短路故障的新方法, 通过对同步发电机发生转子绕组匝间短路后电磁特性和电气参数的变化进行分析, 根据故障发生后励磁电流增加而无功输出量却相对减少的特征, 提出了利用计算和测量故障前后发电机输出无功相对变化率, 作为识别无刷励磁同步发电机转子匝间短路故障严重程度的一个较为实用的方法。利用发电机动态模拟试验机组, 进行了相关的试验验证。

关键词: 无刷励磁同步发电机; 转子绕组匝间短路; 故障诊断判据; 无功功率; 相对偏差

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0106-05

New Criterion on Rotor Windings Inter Turn Short-Circuit Fault Diagnose of Brushless Excitation Generator Based on Reactive Power Relative Deviation

SHEN Liping¹, MA Minghan², LI Yongqing¹, MA Chunquan¹, FENG Xueping¹

(1. Liujiaxia Hydropower Plant, Gansu Electric Power Company of State Grid Corporation of China, Yongjing 731600, China;

2. Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to find a new method to the on-line identification of inter turn short-circuit fault of brushless excitation synchronous generator rotor, the change of electromagnetic properties was analysed and electrical parameters after the synchronous generator rotor windings occurred inter turn short-circuit. According to the characteristic that the exciting current was increasing and the reactive power output was decreasing relatively, a method was put forward which uses generator reactive power output relative change rate which was calculated or measured before and after the fault as a practical criterion for identification of the severity of brushless excitation synchronous generator rotor windings inter turn short-circuit fault. Finally, the relative experiment was carried out using the dynamic analog experiment unit.

Key words: brushless excitation synchronous generator; rotor windings inter turn short-circuit; fault diagnosis criterion; reactive power; relative deviation

0 引言

转子绕组匝间短路故障是汽轮发电机转子的一种典型的电气故障。目前此类故障的诊断方法根据其诊断的实时性可以分为离线方法和在线方

法。离线方法如转子交流阻抗法、RSO 重复脉冲法等,多用于机组大修期间转子的常规检测,而在线检测方法由于其具有实时性的优势,能够对故障进行早期诊断,避免故障扩大,因此得到了更为广泛的重视。

作者简介: 沈利平(1968—),男,高级工程师,研究方向为水电厂电气。

马明晗(1990—),男,博士研究生,研究方向为大型电机在线监测与故障诊断技术。

现阶段主要的几种转子匝间短路在线诊断方法有:定子探测线圈法、励磁电流法、定转子振动检测法以及轴电压法。

定子探测线圈法利用位于定转子气隙中的探测线圈,提取位于转子表面的气隙漏磁场并对采集到的信号进行微分处理,能够实现对转子匝间短路故障的检测和定位。该方法最大的缺点是只适用于发电机在空载状况下运行,负载状态下检测准确性明显下降,属于一种准在线的检测方法^[1-3]。

励磁电流法利用故障前后励磁电流相对增加这一故障特征,对转子匝间短路故障进行实时检测。该方法主要缺陷在于其只适用于静止励磁发电机(有刷励磁发电机),对于目前大型机组广泛采用的旋转励磁发电机(无刷励磁发电机)无法适用^[4]。

定转子振动检测法利用转子匝间短路故障引起的电磁不平衡造成的定转子振动加剧这一故障特征,对故障进行在线识别。该方法的主要缺点在于引起定转子振动加剧的原因有很多,另外也可能多个故障叠加使得振动无法显现,所以使该方法存在应用上的困难^[5-7]。

美国人 Paul I. Nippes 最早将轴电压用于诊断大型旋转机械故障,通过检测轴电压的波形幅值异常来诊断故障。之后,国内学者将此方法应用于转子匝间短路故障的检测上^[8-9]。该方法能够有效地检测出匝间短路故障,但是引起轴电压异常的故障有很多,且理论支持较为薄弱,限制了轴电压法的使用。

除此之外,对于转子绕组匝间短路故障识别的理论研究正广泛开展,诸如通过定子绕组并联支路环流特性、定子振动特性等^[10-15]故障特征对故障进行诊断。

总之,尽管国内外对转子绕组匝间短路故障的在线检测十分重视,但现有的各种方法在应用中还是受到一定的制约,实际测试中得到的结果并不十分理想,发电厂发生转子绕组匝间短路故障后未能及时发现而造成严重后果的事例屡见不鲜,因此有必要进一步提高此类故障的诊断水平。

无刷励磁发电机的轴端头是一台交流发电机,其转子是发电绕组,发出的电流通过固定在发电机轴上的导线引导到固定在轴上的硅整流管,整流后的直流直接进入转子绕组。无刷励磁发电

机原理图如图 1 所示。无刷励磁发电机励磁电流电压是监测不到的,因此利用励磁电流变化识别转子匝间短路是不现实的。无刷励磁发电机在核电机组、燃气轮发电机上普遍采用,因此对其进行转子匝间短路故障在线识别的研究是十分必要的。

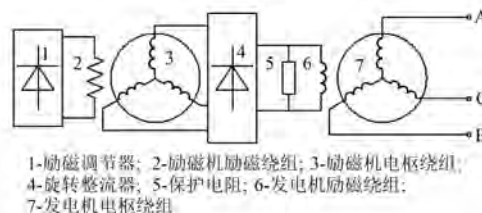


图 1 无刷励磁发电机原理图

本文首先对转子绕组匝间短路的无功相对偏差判据进行了理论上的推导,之后通过故障模拟机组试验对判据进行了试验验证,验证了判据的有效性和准确性。该判据同样适用于有刷励磁发电机,并且较励磁电流法具有更准确的故障程度检测能力。

1 无功相对偏差判据推导

转子绕组匝间短路故障会引起励磁电流的增大,与此同时无功功率减少。对于无刷励磁发电机,励磁电流是不能实测的,发电机励磁是由励磁机的励磁控制的,可以利用可测的励磁机的励磁电流,根据励磁机及整流系统数学模型,计算出正常运行情况下发电机励磁。机组正常运行时,能够确定给出发电机的励磁电流、有功功率以及机端电压值,进而可以计算得到该状态对应的无功标准值 Q ,将其与无功测量值 Q' 比较求得其相对变化率。这一无功相对偏差值能够作为检测转子匝间短路故障的诊断依据。

利用发电机无功变化作为判据识别转子绕组匝间短路的判据推导过程^[16]:

由式(1)发电机派克方程入手:

$$U = p\psi + RI + \omega \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$U = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \psi = \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_{fd} \\ \psi_{ld} \\ \psi_{lq} \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ I_{fd} \\ I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} -r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{ld} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{lq} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_{fd} \\ \psi_{ld} \\ \psi_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{ad} & 0 \\ 0 & -x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aq} \\ 0 & 0 & -x_0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_{ad} & 0 & 0 & x_{ffd} & x_{fld} & 0 \\ -x_{ad} & 0 & 0 & x_{fld} & x_{lld} & 0 \\ 0 & -x_{aq} & 0 & 0 & 0 & x_{llq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ I_{fd} \\ I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix}$$

假定发电机在稳态对称条件下带负载运行, 功角为 δ , 所以有边界条件: $I_{ld} = 0, I_{lq} = 0, i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) = 0, \omega = 1, \psi_d = \text{恒值}, \psi_q = \text{恒值}, u_d = U \sin \delta, u_q = U \cos \delta$ 。

代入派克方程得:

$$u_d = -\psi_q - ri_d = x_q i_q - ri_d \quad (2)$$

$$u_q = \psi_d - ri_q = E - x_d i_d - ri_q \quad (3)$$

$$i_d = \frac{-ru_d + x_q(E - u_q)}{r^2 + x_d x_q} = \frac{-rU \sin \delta + x_q(E - U \cos \delta)}{r^2 + x_d x_q} \quad (4)$$

$$i_q = \frac{x_d u_d + r(E - u_q)}{r^2 + x_d x_q} = \frac{x_d U \sin \delta + r(E - U \cos \delta)}{r^2 + x_d x_q} \quad (5)$$

通常情况下, 同步发电机的定子绕组电阻相较于定子绕组电抗很小, 可以忽略不计, 则式(4)和式(5)可写成:

$$i_d = \frac{E - U \cos \delta}{x_d} \quad (6)$$

$$i_q = \frac{U \sin \delta}{x_d} \quad (7)$$

由式(2)、式(3)、式(6)和式(7)联立可分别得到发电机有功及无功表达式:

$$P = u_d i_d + u_q i_q = \frac{EU}{x_d} \sin \delta + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} \sin 2\delta \quad (8)$$

$$Q = u_q i_d - u_d i_q = \frac{EU}{x_d} \cos \delta - \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} + \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} \cos 2\delta \quad (9)$$

若为隐极同步电机, $x_q = x_d$, 则:

$$P = \frac{EU}{x_d} \sin \delta \quad (10)$$

$$Q = \frac{EU}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \quad (11)$$

发电机空载电动势

$$E = x_{ad} I_{fd} \quad (12)$$

其中:

$$x_{ad} = L_{ad} = M_{afd} \quad (13)$$

$$M_{afd} = \frac{M_{afd0}}{L_{\delta}} \frac{1}{k_{ifd}} \quad (14)$$

$$k_{ifd} = \frac{i_{\delta}}{I_{fd\delta}} \quad (15)$$

$$M_{afd0} = \frac{16\tau lp}{a_s a_{fd} \pi^2} (w_{fd} k_{08fd1}) \left(\frac{w}{2p} k_{081} \right) \lambda_{d11} \quad (16)$$

式中: L_{δ} ——定子自感基值;

$I_{fd\delta}$ ——转子电流基值;

i_{δ} ——定子电流基值;

a_s ——定子绕组支路数;

a_{fd} ——各励磁绕组支路数;

τ ——电机极距;

l ——电机定子线棒有效长度;

p ——电机极对数;

w_{fd} ——转子绕组匝数;

k_{08fd1} ——励磁绕组基波绕组系数;

w ——定子绕组匝数;

k_{081} ——定子绕组基波绕组系数;

λ_{d11} ——气隙磁导系数。

将式(13)~式(16)代入式(12), 得到发电机空载电动势为

$$E = \frac{16\tau lp}{L_{\delta} k_{ifd} a_s a_{fd} \pi^2} (w_{fd} k_{08fd1}) \left(\frac{w}{2p} k_{081} \right) \lambda_{d11} \quad (17)$$

将式(17)代入式(11)得到发电机输出无功和转子匝数关系:

$$Q = a w_{fd} \frac{U}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \quad (18)$$

其中:

$$a = \frac{16\tau lp}{L_{\delta} k_{ifd} a_s a_{fd} \pi^2} k_{08fd1} \left(\frac{w}{2p} k_{081} \right) \lambda_{d11} \quad (19)$$

如果转子绕组发生匝间短路,则无功输出变为

$$Q' = \frac{E' U'}{x_d} \cos \delta' - \frac{U'^2}{x_d} = \frac{16\tau lp}{L_{\delta} k_{ifd} a_s a_{fd} \pi^2} (w'_{fd} k_{08fd1}) \left(\frac{w}{2p} k_{081} \right) \lambda_{d11} \frac{U'}{x_d} \cos \delta' - \frac{U'^2}{x_d} = a w'_{fd} \frac{U'}{x_d} \cos \delta' - \frac{U'^2}{x_d} \quad (20)$$

式中:加撇量——转子绕组发生匝间短路后发电机电量值。

经变换得到发电机发生转子绕组匝间短路故障前后转子绕组匝数表达式:

$$w_{fd} = \frac{Q x_d}{a \cos \delta U} + \frac{U}{a \cos \delta} \quad (21)$$

$$w'_{fd} = \frac{Q' x_d}{a \cos \delta' U'} + \frac{U'}{a \cos \delta'} \quad (22)$$

转子绕组发生匝间短路故障后短路程度判据为

$$a\% = \frac{w_{fd} - w'_{fd}}{w_{fd}} = \frac{\frac{Q x_d}{a \cos \delta U} + \frac{U}{a \cos \delta} - \left(\frac{Q' x_d}{a \cos \delta' U'} + \frac{U'}{a \cos \delta'} \right)}{\frac{Q x_d}{a \cos \delta U} + \frac{U}{a \cos \delta}} \quad (23)$$

由于发电机并网运行,发电机端口电压在转子绕组匝间短路故障前后保持不变:

$$a\% = \frac{w_{fd} - w'_{fd}}{w_{fd}} = \frac{Q - Q'}{Q + \frac{U^2}{x_d}} \quad (24)$$

该判据比无功变化相对值略微小一点,说明发电机转子匝间短路故障引起无功变化更大,如果是凸极发电机,根据发电机输出无功公式,与隐极同步发电机相比,判据比无功相对值更小一点。另外在推导过程中没有考虑发电机磁场饱和和影

响,由于磁场饱和会引起磁场密度相对减小,无功输出将减小,因此该判据数值会受其影响。如果发电机是欠励运行影响几乎没有,如果是过励,影响程度随过励程度增加而增加。另外该判据也适用于有刷励磁发电机。

2 通过模拟机组试验验证发电机转子绕组匝间短路故障判据

因没有无刷励磁模拟发电机故障机组,因此采用华北电力大学动模实验室有刷励磁同步电机 MJF-30-6 型进行转子绕组匝间短路试验,验证新判据的准确性。通过试验获取电气状态监测量,利用上述公式计算发电机正常状态(无故障)下的无功 Q ,然后测量不同转子匝间短路故障下的无功 Q' ,并求出短路判据。具体步骤如下:

- (1) 试验机组并网状态下保持有功输出不变;
- (2) 从 0% ~ 20% 调节转子绕组的短路程度,并记录调节过程中机组的各电气参数;
- (3) 计算各故障状态下的短路判据值。

由图 2 可知,转子绕组发生匝间短路故障后,

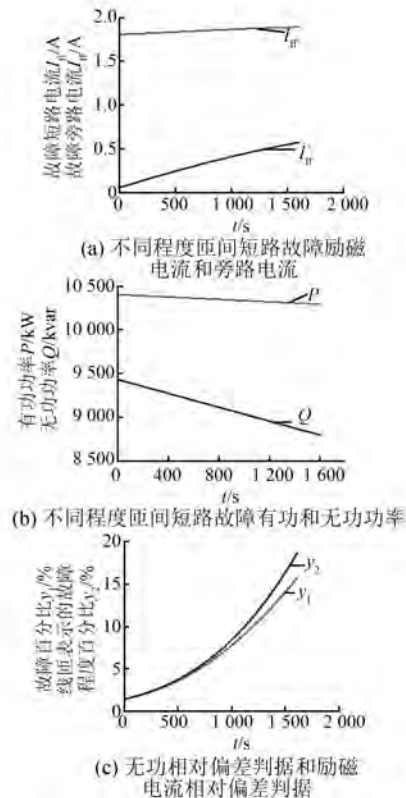


图2 保持定子电流为 20A 时发电机转子绕组匝间短路试验

随着短路程度的增加,励磁电流不断增加,无功功率不断减小,励磁电流判据和无功相对偏差判据随之增加,具有较好的一致性。试验数据如表 2 所示,可以看到无功相对偏差判据较励磁电流判

据具有更高的准确性。
参数数据如表 1 所示。表 2 是定子电流为 20 A 时的发电机电气状态监测量在线记录数据及计算结果。

表 1 试验发电机参数数据

机型	额定电压/V	额定电流/A	功率因数	额定转速/(r·min ⁻¹)	转子电流/A	x_d	w_1	w_f	k_{w1}	k_a
MJF-30-6	400	43.3	0.8	1 000	2	2.5	23	100	0.9	1.35

表 2 转子绕组匝间短路故障前后在线数据及判据

工 况	短路匝数 百分比/ %	有功/ W	无功 测量值/ VA	无功 计算值/ VA	转子电流 测量值/ A	定子 电压/ V	定子 电流/ A	无功相对 偏差/%	励磁电流值相对 计算偏差/%	励磁电流值相对 测量偏差/%	状态
1	0	10 213.2	9 343.06	9 320	1.869 98	400	23.238 73	0.05	0.1	0.02	故障前
2	3.91	10 308.8	9 183.75	9 501	1.954 20	400	22.921 81	4.037	6.802	4.073	故障后
3	6.07	10 293.4	9 098.05	9 690	1.996 64	400	22.857 27	6.251	9.022	6.462	故障后
4	10.06	10 380.2	9 001.37	10 102	2.040 52	400	22.305 66	11.03	14.02	11.183	故障后
5	12.93	10 342.8	8 818.99	10 503	2.120 25	400	22.799 71	13.02	19.00	14.849	故障后
6	14.83	10 003.4	8 420.18	10 720	2.152 96	400	22.682 31	15.13	22.08	17.406	故障后

3 结 语

为了寻找在线识别无刷励磁同步发电机转子绕组匝间短路故障的方法,本文从理论上对故障前后的发电机无功输出进行了推导,根据故障后无功功率减小的特征,建立了转子绕组匝间短路无功相对偏差的诊断模型。模型经过故障模拟机组的试验验证,证明了判据的有效性和准确性。该判据同样适用于有刷励磁发电机,并且较励磁电流法具有更准确的故障程度检测能力。

【参 考 文 献】

[1] ALBRIGHT D R. Inter turn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings [J]. IEEE Transactions on Power and Apparatus Systems, 1971, 90(2): 478-483.

[2] 赵玉升.大型汽轮发电机转子线圈动态匝间短路的检测[J].大电机技术,1982(5): 18-23.

[3] 李永刚,李和明,赵华,等.基于定子线圈探测的转子匝间短路故障识别方法[J].中国电机工程学报,2004,24(2): 107-112.

[4] 李永刚,李和明,赵华.汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J].中国电机工程学报,2003, 23(6): 112-116.

[5] 万书亭,李和明,李永刚.转子匝间短路对发电机定转子振动特性的影响[J].中国电机工程学报, 2005,25(10): 122-126.

[6] 武玉才,李永刚,李和明,等.机电复合故障下汽轮发电机转子振动特性分析[J].高电压技术,2010, 36(11): 2687-2692.

[7] 郝亮亮,吴俊勇,陈占锋,等.转子匝间短路故障对大型汽轮发电机振动的影响机理[J].电力系统自动化,2014,38(4): 25-31+50.

[8] 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.

[9] 武玉才,李永刚,李和明.基于轴电压的隐极同步发电机转子典型故障诊断[J].电工技术学报,2010, 25(6): 178-184.

[10] 武玉才,冯文宗,李永刚,等.励磁绕组短路故障下汽轮发电机的电磁稳态特征[J].高电压技术, 2014,40(5): 1567-1573.

[11] 武玉才,李和明,李永刚,等.在线检测发电机转子绕组匝间短路的新方法[J].高电压技术,2009,35 (11): 2698-2703.

[12] 武玉才,李永刚.基于功率期望原理的汽轮发电机励磁绕组短路故障诊断[J].中国电机工程学报, 2014,34(33): 5934-5940.

(下转第 117 页)

能质量评估指标计算如表 2 所示。

表 2 海上风力发电故障容错性能评估结果

评估指标	无容错方案	有容错方案
风力发电机组 可用率/%	$\left(1 - \frac{T + T_m}{8\,760}\right) \times 100$	$\left(1 - \frac{T_m}{8\,760}\right) \times 100$
风力发电机组 年发电量/(kW·h)	$1\,500 \times (8\,760 - T - T_m)$	$1\,500 \times (8\,760 - T_m)$
期望电能损失	$1\,500 \times (T + T_m)$	$1\,500 \times T_m$
风电场年发 电量/(kW·h)	$1\,500 \times (8\,760 - T - T_m) \times N$	$1\,500 \times (8\,760 - T_m) \times N$

从表 2 可以明显看出,有容错机制单台机组的可用率有所提高,期望电能损失降低了 $1\,500 \times T \text{ kW} \cdot \text{h}$,风电场的年发电量提高了 $1\,500 \times T \times N \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。由上述分析可知,有容错机制的海上风力发电机组可明显提高机组的可用率,减少故障停机损失。

4 结 语

本文结合西蒙决策理论对双馈风力发电机组的容错决策设计过程进行了探究,制定了一般容错方案的容错设计流程,并选取了电能质量和可靠性作为容错评估指标,以双馈风力发电机组侧变流器开路故障容错控制作为分析案例,验证了决策过程和评估指标的合理性,为海上风力发电的容错决策和评估体系提供了量化的数据支撑。

【参 考 文 献】

- [1] 迟永宁,梁伟,张占奎,等.大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(14): 3758-3770.
- [2] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送

研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16): 2513-2522.

- [3] KAIDIS C, UZUNOGLU B, AMOIRALIS F. Wind turbine reliability estimation for different assemblies and failure severity categories [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(8): 892-899.
- [4] 魏书荣,张路,符杨,等.基于拟序阻抗的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(1): 273-281.
- [5] CHEN B, MATTHEWS P C, TAVNER P J. Automated on-line fault prognosis for wind turbine pitch systems using supervisory control and data acquisition [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(5): 503-513.
- [6] 魏书荣,何之倬,黄苏融,等.海上双馈风力发电机组开路故障容错重构技术[J].电力系统自动化,2016,40(16): 83-89.
- [7] 魏书荣,何之倬,符杨,等.海上风电机组故障容错运行研究现状分析[J].电力系统保护与控制,2016,44(9): 145-154.
- [8] SAE-KOK W, GRANT D M, WILLIAMS B W. System reconfiguration under open-switch faults in a doubly fed induction machine [J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(5): 458-470.
- [9] 刘丽丽,闫永新.西蒙决策理论研究综述[J].商业时代,2013(17): 116-117.
- [10] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [11] BUSSEL G J W V, ZAAIJER M B. Reliability, Availability and Maintenance aspects of large-scale offshore wind farms [C] // Marine Renewable Energies Conference, 2001: 119-126.
- [12] IM W S, KIM J M, LEE D C, et al. Diagnosis and fault-tolerant control of three-phase AC-DC PWM converter systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 49(4): 1539-1547.

收稿日期: 2017-03-13

(上接第 110 页)

- [13] 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.
- [14] 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.

- [15] 武玉才,李永刚.基于端部漏磁特征频率的汽轮发电机转子匝间短路故障诊断实验研究[J].电工技术学报,2014,29(11): 107-115.
- [16] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统分析[M].北京:清华大学出版社,1993.

收稿日期: 2016-12-14