

同步发电机定子绕组匝间短路故障诊断研究

赵洪森¹, 戈宝军¹, 陶大军¹, 杨 崑², 邢 广²

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 在对同步发电机定子绕组匝间短路故障负序电流分量产生机理进行分析的基础上, 提出了以负序电流作为故障特征量, 对同步发电机定子内部短路故障进行监测和诊断的方法。基于电路与电磁场有限元理论, 建立同步发电机场路耦合数学模型, 对半载运行下的同步发电机发生定子绕组匝间短路故障进行仿真, 计算出故障发生前后三相电流相角差与幅值以及负序电流分量, 并通过一台功率为 24 kW 的同步发电机实验数据验证了模型的精度与理论分析的合理性。同时, 仿真分析了同一支路短路故障与不同支路短路故障等情况下对负序电流大小的影响, 该结果对同步发电机定子绕组匝间短路故障的监测与诊断具有理论意义。

关键词: 负序电流; 定子短路故障; 场路耦合; 同步发电机; 故障诊断

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.01.018

中图分类号: TM32 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)01-0099-06

Investigation on Stator Winding Inter-turns Short Circuit Fault Diagnosis

ZHAO Hong-sen¹, GE Bao-jun¹, TAO Da-jun¹, YANG Kun², XING Guang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, China)

Abstract: On the basis of negative sequence current generation mechanism analysis of synchronous generator stator winding inter-turns short circuit, the method of detecting and diagnosing synchronous generator stator winding inter-turns short circuit is proposed, which uses the negative sequence current as fault signature. A field-circuit coupled mathematical model of synchronous generator is built, based on the field-circuit coupled principle. Firstly, stator winding inter-turns short circuit happened in synchronous generator with half load is simulated. And then three-phase current phase difference, amplitude and negative sequence current component before and after fault is calculated according to the model. The accuracy of model and rationality of theoretical analysis is demonstrated by the use of experimental data coming from 24 kW synchronous. Meanwhile, the short circuit fault with the same branch and different branch impact on the negative sequence current is also simulated and analyzed. The results have some significance for synchronous generator stator winding inter-turns circuit fault monitoring and diagnosis.

Keywords: sequence current; stator short circuit fault; field-circuit coupled; synchronous generator; fault diagnosis

收稿日期: 2016-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(51407050); 国家科技重大专项专题(2009ZX06004-013-04-01); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z15033); 黑龙江省青年科学基金(QC2016066)。

作者简介: 赵洪森(1987—), 男, 博士研究生;

戈宝军(1960—), 男, 教授, 博士研究生导师。

通信作者: 陶大军(1982—), 男, 副教授, E-mail: tao.dj@163.com.

0 引言

随着电网的迅速发展以及同步发电机单机容量的不断增大,人们对同步发电机的安全可靠运行愈来愈加重视^[1-2]。同步发电机在运行过程中,其主要构件定子热、电、机械、环境应力等共同作用下,会导致绝缘老化,过电压冲击以及机械振动等状况,可能诱发定子匝间短路故障。该故障发生后机组若继续运行则会带来难以估量的经济损失,因此大型发电机定子绕组匝间短路故障的特征及相关参数的研究,对该类故障的早期监测与诊断具有重要意义。

近些年,国内外的许多学者已从不同角度对同步发电机定子内部故障进行了分析和研究^[3],在定子匝间短路故障的监测与诊断方面取得了很多的成果。文[4]以多回路理论为基础,计算并分析定子绕组内部匝间短路后故障支路电流的变化规律,以支路电流的变化作为故障特征量对同步发电机进行诊断。文[5-6]基于 Park 理论,将定子绕组匝间短路时三相电流 Park 矢量模轨迹所发生的变化作为故障特征量对电机定子绕组匝间短路进行故障诊断。文[7]将定子组三相电流 Park 矢量模轨迹与模糊神经网络算法相结合,用在电机定子匝间短路故障实现诊断与保护。文[8]提出以同步发电机机端负序电压、主变高压侧负序电压、主变中压侧负序电压作为主判据和闭锁判据,用来实现同步发电机定子匝间短路的诊断与保护。文[9-10]对发电机运行时定子绕组内部匝间短路故障发生前后的电磁转矩做出了理论分析,并提出以二倍频电磁转矩作为同步发电机定子匝间短路故障监测特征量。文[11]得到作用于转子的不平衡电磁力特性和作用于定子的脉振电磁力特性以及定转子振动特性,将电磁力与振动引入到定子匝间短路故障诊断方法当中。文[12]采用 R/S 分析与小波变换相结合的方法得到定子匝间短路后相电流与相电压的谐波分量变化作为其故障的特征量来实现诊断。文[13]分析了汽轮发电机定子匝间短路故障下的并联环流特性,以及故障发展对环流特性的影响,将定子支路间环流作为故障特征量进行研究。文[14]基于场路耦合原理,分析了故障后定子各支路电流随着短路匝数、短路时刻以及短路位置不同的变化规律,为基于支路电流变化的定子匝间短路故障诊断提供了更多的理论支持。

同步发电机定子内部匝间短路故障同外部相间

短路故障一样^[15],皆属于电机不对称运行,故障后的定子相电流理论上也会产生额外的负序电流分量。本文基于电路与电磁场有限元理论,建立隐极同步发电机场路耦合数学模型,并通过实验对模型进行验证,进一步研究定子负序电流的大小随短路大小与位置的变化规律,为同步发电机的诊断与保护提供新的研究途径。

1 定子匝间短路故障后负序电流的产生机理分析

同步发电机正常负载运行时,气隙磁场为一正向旋转的磁场,它在定子绕组中感应出对称的三相电流。当定子绕组发生匝间短路故障时,将在短路回路中产生附加环流 I_k ,而短路环中的附加环流产生的磁场为一以短路匝绕组轴线为中心的脉振磁场,脉振频率为额定频率,脉振磁动势为:

$$f_g = F_g \cos(wt) \cos(p\alpha) = F_{g+} \cos(wt - p\alpha) + F_{g-} \cos(wt + p\alpha) \quad (1)$$

式中第一项 $F_{g+} \cos(wt - p\alpha)$ 与转子同步旋转,在转子中不感应附加的电势,而第二项 $F_{g-} \cos(wt + p\alpha)$ 与转子转向相反,在转子中产生 $2w$ 的附加电势,则转子励磁绕组中必然会产生 $2w$ 的附加励磁电流,设此附加励磁电流为 $I_{f2} \cos 2wt$,其产生的磁感应强度为 $B_2 \cos 2wt$,其中 I_{f2} 为附加励磁电流的幅值, B_2 为附加励磁电流产生的磁感应强度的幅值。

结合文[6]可得故障后定子绕组短路附加环流产生的附加定子电枢绕组感应电动势为:

$$E_a = \sqrt{2} E \cos wt = (\sqrt{2} KB_2/2) \cos wt + (\sqrt{2} KB_2/2) \cos wt \quad (2)$$

$$E_b = \sqrt{2} E \cos(wt - 120^\circ) = (\sqrt{2} KB_2/2) \cos(wt + 120^\circ) + (\sqrt{2} KB_2/2) \cos(3wt - 120^\circ) \quad (3)$$

$$E_c = \sqrt{2} E \cos(wt + 120^\circ) = (\sqrt{2} KB_2/2) \cos(wt - 120^\circ) + (\sqrt{2} KB_2/2) \cos(3wt + 120^\circ) \quad (4)$$

式中, $K = 4.44 f N_\phi k_{w1} l \tau$ 中, N_ϕ 为同步发电机定子每相绕组的串联匝数, k_{w1} 为定子的基波绕组因数, l 为定子铁芯有效长度, τ 为极距。

式(2)~(4)第一项定子电枢绕组感应电动势是反向旋转,在定子绕组中产生负序电流,也就是说

同步发电机定子绕组发生匝间短路故障后,相电流中会产生负序分量。因此,以定子负序电流作为发电机内部短路故障的特征量,是可以有效的监测与诊断发电机的内部故障。

2 同步发电机内部故障场路耦合数学模型

2.1 电机电磁场有限元模型

假设电机内的电磁场是似稳场,忽略位移电流,并且发电机的矢量磁位和电流密度只有轴向分量,即

$A = A(x, y) \cdot k, J_s = J_s(x, y) \cdot k$, 由麦克斯韦方程可推得瞬态电磁场方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (5)$$

式中: x, y 为平面的横坐标和纵坐标, k 为轴向分量的单位矢量; A 为 N 维矢量磁位轴向分量, 其中 N 为节点总数。

忽略有源电流区域的涡流, 采用三角形线性剖分, 式(8)离散后可得:

$$-Q \cdot pA - K \cdot A + C_b \cdot I_b = 0 \quad (6)$$

式中, 其中 N 为节点总数; I_b 为 M 维线圈电流矢量, 其中 M 为定子回路、励磁回路与阻尼回路之和; C_b 表示线圈中的电流与各单元节点之间相互作用的关联矩阵; K, Q 为系数矩阵, 可以由有限元分析得到^[14-16]。

2.2 考虑电机内部故障的电路方程

场路耦合数学模型中, 考虑电机内部故障的电路方程与多回路模型是一致的。电机的总回路为 M , 电机中所有回路的电压方程可表示为

$$U = p\Psi + R \cdot I \quad (7)$$

式中, U, Ψ 和 I 分别为各回路的电压、磁链和电流, 都为 M 阶的列向量矩阵; R 为 M 阶的回路电阻矩阵。

在电路模型中, 回路的磁链包含两部分, 一部分是线圈端部漏磁链, 另外一部分是线圈直线部分磁链。端部漏电感可采用多回路方法进行计算, 直线部分的磁链包括与气隙有关的主磁链和除端部以外的漏磁链, 它与铁心饱和、涡流、磁极形状及齿槽有关, 采用有限元方法计算^[17-19]。

2.3 考虑电机内部故障的场路耦合方程

考虑定子内部短路故障的场路耦合数学模型, 其矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} -Q & 0 \\ l_{ef} \cdot C^T & M_L \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K & C \\ 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, C 为关联矩阵, 表示回路电流与各单元节点之间的相互作用, 有 $C = C_b \cdot G$; G 表示所有线圈电流与回路电流的关联矩阵, 有 $I_b = G \cdot I$; M_L 为端部漏感矩阵; l_{ef} 为定子铁芯长度。

3 负序电流的仿真计算与分析

3.1 同步发电机的基本参数

本文以动模实验室 MJF-30-6 隐极同步发电机为例, 建立全域场路耦合数学模型, 对发电机故障后负序电流进行仿真计算, 并进行实验验证, 电机主要参数如表 1 所示。

表 1 同步发电机主要参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_N /kW	24	铁心有效长 l_t /mm	220
额定电压 U_N /V	400	定子外径 D_1 /mm	990
额定电流 I_N /A	43.30	定子内径 D_{i1} /mm	423
额定励磁电流 I_f /A	2.20	最小气隙 H_0 /mm	1.10
空载励磁电流 I_{f0} /A	0.87	励磁绕组匝数	280
功率因数	0.80	极数 p	6

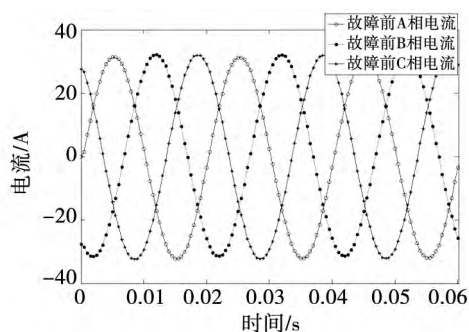
隐极发电机定子槽数为 54, 定子绕组每相并联支路数为 2, A 相第一支路引出 2% 和 20% 两个抽头, 用来模拟发电机定子绕组 2% 到 20% 匝间短路。实验采用波谱公司生产的 U60116C 型数据采集仪, 设置采样频率为 10 kHz, 电流一个周期采样 200 点。

3.2 负序电流的仿真计算与实验验证

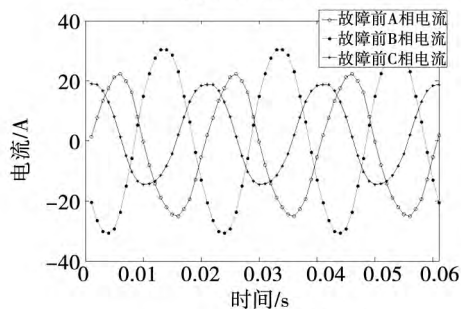
转速恒定, 同步发电机并网半载运行, $P = 12$ kW, $Q = 9$ kVar, $I_f = 1.40$ A, 采用场路耦合模型对 A 相绕组第一支路 2% - 20% 短路故障进行仿真计算, 得到发电机故障前后三相电流波形。图 1(a) 和图 1(b) 分别给出了同步发电机故障前后三相电流稳态仿真波形, 图 2(a) 和图 2(b) 给出了同步发电机故障前后实验采样波形。

从图 1 和图 2 可以看出, 定子绕组发生匝间短路故障后, 三相电流大小不再对称, 故障后三相稳态电流的仿真波形与实验波形基本吻合。

表 2 给出了同步发电机故障前后定子绕组三相电流相角差的仿真值与实验值, 表 3 给出了同步发电机故障前后的正序电流、负序电流的仿真值与实

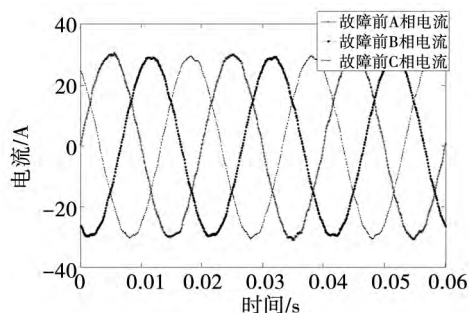


(a) 正常发电机

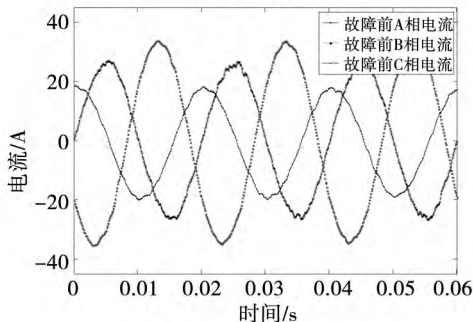


(b) 2%-20%内部故障发电机

图1 不同状态定子绕组三相电流仿真值



(a) 正常发电机



(b) 2%-20%内部故障发电机

图2 不同状态定子绕组三相电流实验值

验值。

理论上,同步发电机正常运行状况下,定子三相电流是对称的,相角差为 120° ,且不存在负序分量。但表2和表3显示正常运行时三相电流相位差的实验值与仿真值皆接近 120° ,且存在微量的负序电流分量。这是由于电机内部结构、外部非故障环境因

素以及数据的提取与计算误差造成的,并不影响分析结果。可以将故障后三相电流相位差和负序电流分量与正常运行情况下相比较(相当于作为同步发电机本身系统具有飘零,这是一个去除飘零的操作),以准确得出三相电流相位差与负序分量的变化程度。从表1可以看出,同步发电机发生定子绕组匝间短路故障后,三相电流之间相位差的对称性遭到破坏,其中,AC两相之间的相位差偏离 120° 最大。表2展示故障发生后,三相电流也产生了一定量的负序电流,负序电流的实验值与仿真值吻合,验证了模型的准确性与上述理论的合理性。

表2 故障前后定子三相电流相差角

相	相角差($^\circ$)			
	实验值		仿真值	
	故障前	故障后	故障前	故障后
AB相	118.87	145.87	119.12	144.97
AC相	121.49	82.96	120.26	83.67
BC相	119.64	131.17	120.42	132.35

表3 故障前后的负序电流和正序电流

电流	实验值		仿真值	
	故障前	故障后	故障前	故障后
I_n/A	0.39	9.29	0.02	9.44
I_p/A	29.83	25.69	30.04	26.80
$I_n/I_p/\%$	1.31	36.16	0.07	35.22

3.3 同相分支匝间短路负序电流特性

如图3所示,单机半载运行的同步发电机,定子绕组A相第一支路(A1支路)发生对中性点的匝间短路故障(k 固定在中性点处, j 可移动),电弧电阻为0。图4给出了三相电流负序分量随着短路线圈数变化的仿真结果,其中横坐标为A1支路中从故障点到中性点的短路线圈数,纵坐标为负序电流幅值。从图中可以看出,负序电流幅值随着短路线圈数的增加而增加,当A1支路短路8个线圈时(即一个支路88.89%被短路),负序电流占正常半载运行时电流的54.27%,如果接近于100%短路,则相当于电机单相对中性点短路,负序电流将更大。这是由于随着短路线圈数的增加,气隙磁场畸变严重,三相不对称程度更加严重,负序电流必然会增大。

半载下运行的同步发电机A1支路发生相同程度的匝间短路故障,如图3所示,故障回路的被短路匝数保持不变,故障点 k,j 随故障位置不同而移动。

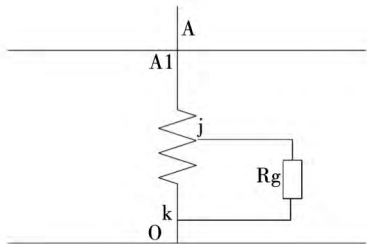


图 3 同支路匝间短路

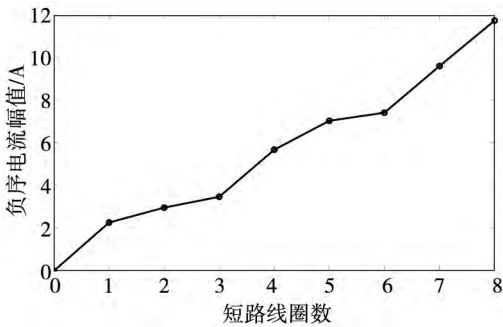


图 4 负序电流幅值与短路线圈数的关系

表 4 列出了 A1 支路发生六种相同匝比的匝间短路故障时,正负序电流大小与正负电流的比值。尽管短路匝数相同,且发生在同一支路上,但由于短路空间位置不同,短路线圈同其他所有回路的互感系数不同,短路后的负序电流分量也有所不同,由于所选择机容量较小,所以六种短路情况下各负序电流相差不大。

表 4 六种不同位置匝间短路故障正负电流仿真结果

故障位置	I_n / A	I_p / A	$(I_n / I_p) / \%$
A1_0 - 16.67%	2.68	28.24	9.49
A1_16.67% - 33.34%	2.70	28.28	9.55
A1_33.34% - 50%	2.86	28.17	10.15
A1_50% - 66.67%	2.78	28.20	9.86
A1_66.67% - 83.43%	2.74	28.19	9.72
A1_83.43% - 100%	2.69	28.31	9.50

如图 5 所示,同步发电机单机半载运行,A1 对 A2 发生同相不同分支间短路故障。A1 故障点 k 在支路中间,A2 故障点 j (可移动) 到支路中间位置的线圈差为 n (其中靠近中性点为负,靠近端部为正)。图 6 为电流负序分量随 n 的变化规律,从图中可以看出,当 $n=0$,即 k, j 两点都处于各支路中间时,短路点 k 与 j 为等位点,电机各回路电流均为正常运行时电流, k 与 j 这两点短路对电机运行没有任何影响。当 j 点向两侧移动时,随着 A2 支路故障点 j 到支路中间位置的线圈数增加,短路回路由气隙磁场

产生的感应净电势逐渐增加,负序电流逐渐增大。

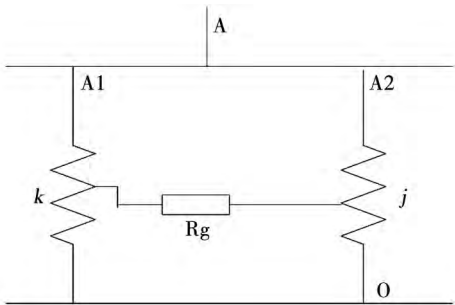


图 5 同相支路间短路

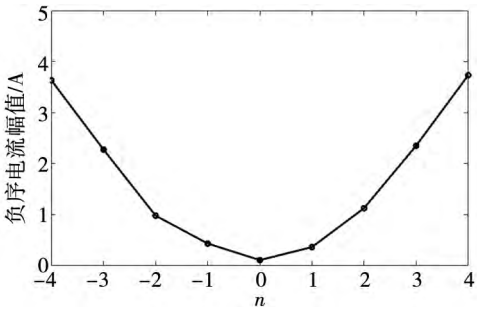


图 6 负序电流幅值与 n 的关系

4 结 论

本文从理论上分析了同步发电机定子绕组匝间短路故障负序电流分量的产生,并建立场路耦合数学模型,对同步发电机匝间短路进行仿真,得到如下结论:同步发电机发生定子匝间短路故障后,三相电流的对称性遭到破坏,定子绕组中会产生负序电流分量。同一分支发生匝间短路时,负序电流随着短路线圈的增加而增大,并随着短路位置的不同而改变。同相不同分支发生匝间短路时,若两支路短路匝数与位置相同时,电机仍处于正常运行,若两支路短路匝数或位置不同时,电机则会产生负序电流,且负序电流会随着匝数差的增加而变大。本文所得到的结论为基于负序电流的定子短路故障诊断方法提供了理论基础,对同步发电机多特征量短路故障诊断系统的研发具有一定的意义。

参 考 文 献:

[1] 叶志军,游佰强, J. Rosendahl, 等. 基于 FLUX2D 的大型同步发电机在额定运行下定子绕组匝间短路故障特性的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 125-132.

[2] 李伟清. 汽轮发电机故障检查分析及预防 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[3] 孟大伟,王秀兰,施道龙. 大型电机铁心片间短路故障实验与

- 数值仿真分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(2): 78-83.
- [4] 胡敏强, 屠黎明, 林鹤云, 等. 水轮发电机定子绕组内部故障稳态电量仿真及规律探讨 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 3-8, 47.
- [5] Cardoso A J M, Cruz S M A, Foneca D S B. Inter-turn stator winding fault diagnosis in three phase induction motors by Park's vector approach [J]. IEEE Trans on EC, 1999, 14(3): 595-598.
- [6] Sergio M A, Cruz A J. Stator winding fault diagnosis in three phase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1310-1318.
- [7] 王旭红, 陈艳, 彭建春. 在线监测电机定子绕组匝间短路故障的新方法 [J]. 高电压技术, 2003, 29(1): 28-30.
- [8] 俞胜, 仇新宏, 李哲, 等. 基于负序电压分布的发电机定子匝间短路保护 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 72-74.
- [9] 方红伟, 夏长亮, 修杰. 定子绕组匝间短路时发电机电磁转矩分析 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 83-87.
- [10] 方红伟, 夏长亮, 李国平. 同步发电机定子绕组匝间短路下电磁转矩和振动分析 [J]. 天津大学学报, 2009, 40(4): 322-326.
- [11] 万书亭, 李和明, 许兆凤, 等. 定子绕组匝间短路对发电机振动特性的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 161-165.
- [12] 夏长亮, 金雪峰, 方红伟, 等. 基于 R/S 分析和小波变化的同步发电机定子绕组匝间短路故障分析 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 101-105.
- [13] 何玉灵, 万书亭, 唐贵基, 等. 定子匝间短路对发电机并联支路环流特性的影响 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(3): 1-7.
- [14] 戈宝军, 肖士勇, 吕艳玲, 等. 水轮发电机定子绕组内部故障暂态电流研究 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(3): 40-45.
- [15] 董传友. 大型核电汽轮发电机短路故障瞬态负序电流分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(3): 97-100.
- [16] 孙宇光, 王祥珩, 桂林, 等. 场路耦合法计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 136-141.
- [17] 戈宝军, 梁艳萍, 温嘉斌. 电机学 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [18] 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, 1994.
- [19] 汤蕴璆, 梁艳萍. 电机电磁场的分析与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.

(编辑: 关毅)

(上接第98页)

参考文献:

- [1] 魏新劳, 朱博, 庞兵, 等. 500 kV 海底充油电缆护套绝缘在线监测方法 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(5): 21-29.
- [2] 孙晓雅, 李永倩, 李天等. 基于光纤光栅的开关柜温度在线监测系统 [J]. 电力系统通信, 2012, 33(5): 6-10.
- [3] 陈庆国, 蒲金雨, 丁继媛, 等. 电力电缆局部放电的高频与特高频联合检测 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(4): 39-44.
- [4] 王超, 刘毅刚, 刘刚, 等. 有限元法应用于电缆终端应力锥缺陷分析 [J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 152-154.
- [5] 杨黎明, 朱智恩, 杨荣凯, 等. 柔性直流电缆绝缘料及电缆结构设计 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 117-124.
- [6] 叶远波, 孙月琴, 黄太贵, 等. 继电保护相关二次回路的在线状态检测技术 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 108-113.
- [7] 季仲致, 曹军, 姜滨. GPRS 技术在木材干燥窑数据传输系统中的应用 [J]. 自动化仪表, 2014, 35(3): 42-45.
- [8] 陈涛, 黄艳玲. 基于 GSM 网络变压器远程数据终端的设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(2): 78-81.
- [9] 阳林, 郝艳捧, 黎卫固, 等. 输电线路覆冰与导线温度和气象参数关联分析 [J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-776.
- [10] 李秀婧, 高欢, 刘骥, 等. 脐带温度场与载流量分析计算 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(2): 85-89.
- [11] 黄新波, 王霄宽, 方寿贤, 等. 智能变电站断路器状态监测 IED 设计 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 95-99.
- [12] 黄炜宏, 谢章洪, 陈祥伟, 等. 基于 Zigbee 技术的成套式开关设备温度监测系统的设计与应用 [J]. 高压电器, 2013, 49(2): 125-130.
- [13] 黄新波, 赵隆, 舒佳, 等. 输电线路导线微风振动在线监测技术 [J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1863-1865.
- [14] 郑争兵, 赵峰. 基于 GSM 的远程心率监控系统设计 [J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 2082-2084.
- [15] 董静薇, 李会乐, 郭艳雯, 等. 基于 Zigbee 的粮食温湿度监测系统 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(4): 120-124.
- [16] 赵学风, 蒲路, 琚泽立, 等. XLPE 电力电缆附件局部放电测量与分析 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(6): 94-101.
- [17] 王凯, 李智, 李名兆. 无线通信自动校准系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(2): 101-104.
- [18] 刘骥, 宗榜旭, 张显亮, 等. 一种双电流互感器感应切换式取电装置: 中国, 201521003976.0 [J]. 2016-4-6.
- [19] 魏新劳, 朱博, 庞兵, 等. 拆装式 PCB 型 Rogowski 线圈的研究 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(4): 7-13.
- [20] 贺伟. 基于分布式光纤的电缆温度监测系统及其数据处理研究 [J]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [21] 朱若茜, 张礼勇. 无线传感器网络监测环境中的煤矿安全度评价 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(3): 32-35.

(编辑: 温泽宇)