

基于有限元方法的大型永磁直驱 同步风力发电机电磁场计算

何山¹, 王维庆¹, 张新燕¹, 赵祥²

- (1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830047;
2. 国家风力发电工程技术研究中心, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830026)

Electromagnetic Field Calculation of High Capacity Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Wind Power Generator Based on Finite Element Method

HE Shan¹, WANG Wei-qing¹, ZHANG Xin-yan¹, ZHAO Xiang²

- (1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;
2. National Wind-Power Engineering Technology Research Center, Urumqi 830026, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

ABSTRACT: By use of finite element method (FEM) software and based on electromagnetic field theory, the modeling of permanent magnet synchronous wind power generator whose capacity is 1.2MW is carried out. The static and transient magnetic fields of the generator are calculated. The distribution of static air gap magnetic field of the generator is researched and by means of Fourier decomposition the fundamental harmonic and high-order harmonic in the air gap are solved. The high-order harmonics are elicited by rotor-skewing, thus the practical effect of improving magnetic density by rotor-skewing is realized. For transient magnetic field, by use of circuit analysis method, according to the circuit coupling function of finite element method the waveform of transient magnetic field and electromotive force are obtained. Based on the experimental data, the calculation results of static and transient magnetic field are compared, the reasons causing inexact data are analyzed, and the correctness and effectiveness of the author's theoretical analysis results are verified.

KEY WORDS: finite element method (FEM); direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator; electromagnetic field; calculation

摘要: 用有限元软件和电磁场知识对 1.2 MW 永磁风力发电机建模, 计算了发电机的静、瞬态磁场。研究了发电机静态气隙磁场的分布, 通过傅里叶分解, 得出了气隙磁密基波和高次谐波。采用转子斜极方法消除高次谐波, 得到了转子斜极改善磁密分布的实际效果。对于瞬态磁场, 采用电路分

析方法, 根据有限元方法的电路耦合功能, 得出了发电机磁场和电势波形。结合实验数据, 对比了静、瞬态磁场计算结果, 分析了数据产生偏差的原因, 验证了理论分析的正确性和有效性。

关键词: 有限元方法; 永磁直驱同步风力发电机; 电磁场; 计算

0 引言

永磁直驱风力发电系统变频器的容量较大, 频率范围通常为 1~3 kHz。发电机矩形的电势波形和传统正弦波形完全不同。发电机的功率较大以及电势波形中谐波含量复杂、谐波幅值大小等因素对发电机的磁场分布影响很大。上述因素对后续整流逆变元器件的参数选择十分重要^[1-7], 因此深入研究永磁直驱风力发电机的电磁场很有必要。

传统电机电磁场设计包括直接求解电磁场法、“场化路”法、等效网络法等^[8]。采用传统电机电磁场设计方法建模和计算速度慢, 需使用经验公式和系数, 准确性不高, 修改材料不便。有限元软件建模方便, 材料多样, 计算便利, 后处理功能可对结果进行深入分析。若使用 APDL 语言, 计算速度更快, 在磁场的基础上还可进行温度场耦合计算^[9]。文献[10]应用静态磁场一次算法和齿磁通法计算了同步发电机的磁场, 并比较了优缺点, 但只针对静态磁场, 没有进行瞬态分析。文献[11]应用傅里叶分解得出了传统的多相异步电动机谐波电流与建立的谐波电势的关系, 谐波次数较低, 忽略了高次谐波。文献[12]探讨了斜槽对无刷直流电动机各次

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50867004, 50767003); 新疆教育厅高校科研项目(XJEDU2008S11)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50867004, 50767003).

谐波转矩的影响，确定了一个最佳斜槽角度。文献[13]研究了定子斜槽、非均匀气隙对永磁同步发电机性能的影响。文献[14-15]对传统励磁的同步发电机定子斜槽的空载电压波形进行了数值计算，同时对齿磁通进行了计算。MW级永磁同步风力发电机采用转子斜极，且气隙磁密近似为矩形波，这种特殊情况对发电机性能的影响未见报道。

本文将采用有限元法计算永磁风力发电机的静、瞬态磁场及产生的电压，采用傅里叶分解得到转子斜极对谐波的实际削弱效果，并比较静、瞬态磁场的计算结果，分析其产生原因。

1 1.2 MW 永磁风力发电机基本设计参数

1.2 MW 永磁同步风力发电机采用外转子(磁钢旋转)结构，空冷。额定功率 $P_N=1.2\text{MW}$ ，额定功率因数 $\cos\phi_N=0.9$ ，额定电压 $U_N=690\text{V}$ ，额定转速 $n_N=20\text{r/min}$ ，定子槽数为 576，极对数为 48，额定频率为 16 Hz，三相双绕组结构，绕组温升不大于 60 K。

2 1.2 MW 永磁风力发电机静态磁场分析

2.1 前处理和材料属性的定义

对空气、绕组以及绝缘材料等定义相对磁导率 $\mu_r=1$ ；定子铁心和转子磁轭符合 B-H 曲线；永磁体为钕铁硼永磁，其室温下的回复磁导率为 1.05，剩余磁密为 1.28 T，矫顽力 907 kA/m。

2.2 建模

根据永磁同步风力发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)周期性对称的结构特点，取两对极区域局部建模，模型与实物尺寸的比例为 1:1，如图 1 所示。图中 A、B、C、D 为 4 个节点。

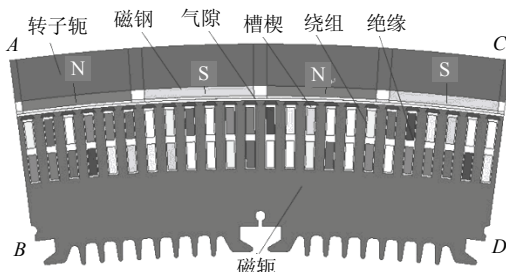


图 1 PMSG 模型
Fig. 1 Model of PMSG

2.3 边界条件的定义和求解

在模型的左右边界线上满足对称条件，即 $A_z(AB)=-A_z(CD)$ ，即 A、B 节点的向量磁位等于 C、D 节点的向量磁位。由于空气的磁导率相对铁质材

料小很多，故认为模型的上、下边界符合第 2 类齐次边界条件。图 2 为磁场分布云图，考虑叠片系数对磁密的影响，实际铁心片中的磁密应为计算结果除以 0.96。从图 2 可得，定子齿部 1/3 高处的磁密约为 1.552 T。

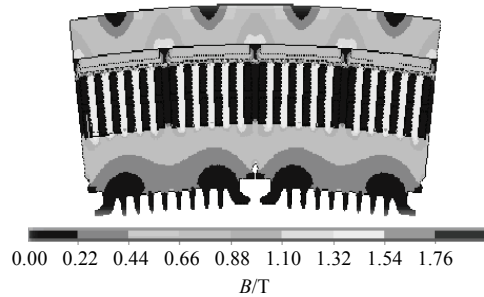


图 2 磁场分布云图
Fig. 2 Nephogram of magnetic field

2.4 气隙中心处的磁场分析

气隙中心处的磁密波形见图 3。由图 3 可看出，定子槽的存在使气隙磁导不均匀，气隙磁密分布为梯形波，顶部和底部为锯齿状，磁密最大值为 0.812 T。

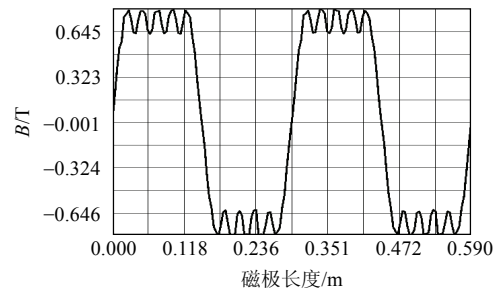


图 3 气隙中心处的磁密波形
Fig. 3 Magnetic flux density wave of air gap center

对气隙磁通密度作傅里叶变换可得基波及各次谐波。根据数学知识，任何满足狄义赫利条件的周期函数可分解为傅里叶级数，即

$$f_t = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (1)$$

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) \cos n\omega_1 t dt \end{cases} \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) \sin n\omega_1 t dt \quad (3)$$

对磁密波形进行傅里叶分解，其结果见表 1。由表 1 可知，气隙磁密主要为基波和 3、5、7、11、13 次等谐波分量，其中 3 次谐波分量相对较大。受电机齿槽效应的影响，气隙磁密存在锯齿，增加了电机的振动，同时使电机定子铁心齿部产生较大铁耗。为消除或减小齿槽效应的影响，电机设计中转

表1 气隙磁通密度的傅里叶分解结果
Tab.1 Fourier decomposition results of air gap flux density

a_1	a_3	a_5	a_7	a_{11}	a_{13}
0.004 5	0.003 5	0.002 9	0.001 6	0.003 5	-0.005 0
b_1	b_3	b_5	b_7	b_{11}	b_{13}
0.905 1	0.251 9	0.099 5	0.032 6	-0.063 2	0.041 9

子磁极可以使用斜极。

2.5 转子磁极斜极后的气隙磁密

实际设计中,由于电机轴向尺寸较小(仅0.9m),通常由小块永磁体粘接形成大块的转子磁极,所以转子斜极较定子铁心斜槽的工艺操作方便。从理论上讲,采用转子磁极倾斜一对齿槽宽度可以消除嵌齿扭矩,改善气隙磁密和电动势波形。在2维电磁场计算中,只有一个自由度 A_z ,不能直接考虑斜极的影响,因此可采用离散积分法,将齿槽分割成许多小角度,转子每转动一个小角度计算1次电磁场,然后将结果叠加。分割数为20时,精度可完全满足要求。考虑斜极后,一对极气隙磁密波形见图4。

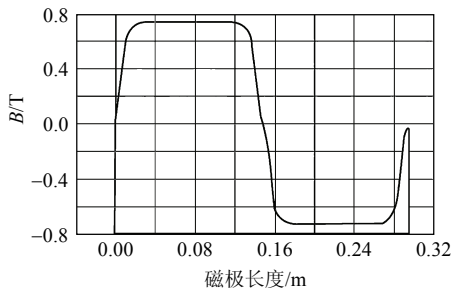


图4 转子斜极后的气隙磁密波形

Fig.4 Flux density wave with rotor skew pole

对比图3、4可知,转子斜极后,气隙磁密波形顶部变得平坦,可有效消除高次谐波。对图4的波形做傅里叶变换,结果如表2所示。对比表1、2可知,转子斜极后,11次谐波较采用直极时明显减小。

表2 转子斜极后的磁密谐波分量
Tab.2 Harmonic of magnetic flux density with rotor skew pole

a_1	a_3	a_5	a_7	a_{11}	a_{13}
0.035 8	0.035 8	0.0347	0.037	0.032	0.031 4
b_1	b_3	b_5	b_7	b_{11}	b_{13}
0.909	0.255	0.107	0.042 1	-0.005 22	0.011 8

2.6 空载电动势的计算

同步发电机空载电动势基本方程式为

$$E_0 = \sqrt{2}\pi f N K_{dp1} \phi_{10} \quad (4)$$

式中: f 为额定频率; N 为每相串联匝数; K_{dp1} 为绕组因数; ϕ_{10} 为空载基波气隙磁通。1.2 MW 永磁同步电机为双三相整矩绕组,绕组系数为1。转子磁极为斜极,斜槽宽距离为24.544 mm,极距为147.2 mm,

斜槽中心角为0.523 rad,因此斜槽因数为0.988。考虑到实际粘接的每块磁钢之间存在缝隙,计算结果还应乘以每极的填充率,这样即可得出额定转速下各高次谐波的空载电动势,计算值和厂家提供的设计要求值见表3。

表3 高次谐波空载电动势的计算值与设计要求值

Tab.3 Calculation values and design values of no-load electromotive force of high order harmonic

物理量	计算值/V	设计要求值/V	相对误差/%	说明
E_0 的均方根	432.900	440.00	-1.60	符合要求
E_0 的基波	417.560	422.95	-1.27	符合要求
E_0 的3次谐波	106.670	—	—	—
E_0 的5次谐波	38.570	<42.30	-8.80	符合要求
E_0 的7次谐波	13.207	<12.70	4.00	偏大

3 1.2 MW 永磁发电机的瞬态磁场分析

3.1 纯阻性负载磁路耦合瞬态电磁场基本方程

静态磁场分析的是某一时刻的空载磁场,实际的发电机转子围绕主轴旋转,有电枢电流存在,静态磁场分析已不能满足要求。采用运动边界法分析瞬态电磁场,可在不同的载荷步定义不同的定、转子相对位置,实现转子的转动,且考虑了积分效应。通过建立不同的外电路,还可模拟电机在多种工况下的运行特性^[16-17]。

式(5)~(11)为整个场域的电磁、电路方程^[18],其中式(5)~(8)分别为空气区域、涡流区域、永磁区域、绕组区域的电磁方程。联立磁场边界条件以及各种介质连续性方程可求解整个场域及电路的未知参数:

$$\nabla^2 A_z = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v_1 \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_1 \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \sigma_1 \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v_2 \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_2 \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = \sigma_2 \frac{\partial A_z}{\partial t} - J_{zpm} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{N}{S_f} I = 0 \quad (8)$$

$$E_0 = \frac{N L_{ef}}{A_b} \frac{\partial}{\partial t} \int_{A_b} A dx dy \quad (9)$$

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + j \dot{I}_d X_d + j \dot{I}_q X_q \quad (10)$$

$$U = IR \quad (11)$$

式中: I 为电流; A_z 为向量磁位; v 为磁阻率; σ 为电导率; J_{zpm} 为电流密度; S_f 为槽满率; L_{ef} 为电枢计算长度; A_b 为槽面积; R_a 为绕组电阻; I_d 、 I_q 为直轴和交轴电枢电流; X_d 、 X_q 为直轴和交轴同步电抗; E_0 为空载电动势。图5为永磁同步发电机的等

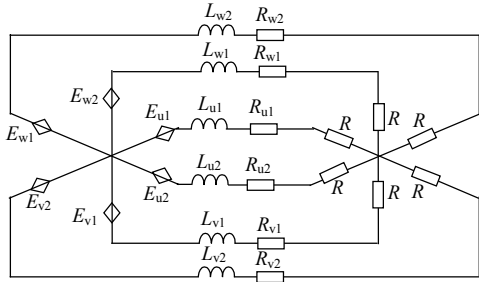


图5 PMSG的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of PMSG

效电路。图中： E 为发电机电势； L 为发电机电感； R 为发电机电阻。通过调节负载阻抗 R 的性质及大小，可模拟不同工况下发电机的运行特性；下标 v_1 、 v_2 、 u_1 、 u_2 、 w_1 、 w_2 表示相别。

3.2 空载电磁场分析

将图5的负载电阻 R 设为无穷大(如 $10^{20} \Omega$)，即可得到图6所示的空载运行结果。由图6可知：磁力线主要集中在磁极正下方的定子齿部及定、转子轭部，当某定子齿刚好位于一对极的气隙处时，该定子齿无磁通流过，空载漏磁场较小。

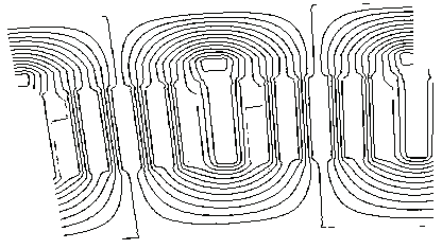


图6 空载运行状态下的磁密分布

Fig. 6 Distribution of magnetic flux density without load

3.3 空载电势

求解磁路耦合方程中的电路方程，可得各相绕组的空载电动势。图7为该电机六相绕组的空载电势波形，其中 T 为电压周期。由图7可知： u_1 与 u_2 、 v_1 与 v_2 、 w_1 与 w_2 之间电压相位角差为 30° ，而 u_1 与 v_1 、 u_2 与 v_2 、 v_1 与 w_1 、 v_2 与 w_2 、 w_1 与 u_1 、 w_2 与 u_2 之间相位角相差 120° ；由于转子磁极为矩形，因此气隙磁密波形为矩形波，电势波形为矩形波；受定子槽的影响，且在计算中没有考虑斜槽效应，

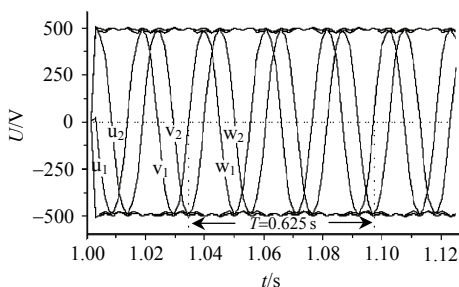


图7 PMSG的相电压波形

Fig. 7 Phase-voltage wave of PMSG

气隙磁密为带有微小锯齿的平顶波，因此空载电势波形顶部带有纹波；通过对空载电势进行计算，可得其周期为 0.0625 s ，频率为 16 Hz 。根据空载电势波形，采用傅里叶变换，可求出其基波电势及3、5、7次电势，各次谐波电势见表4。

表4 PMSG空载电动势的计算结果比较
Tab. 4 Comparison results of no-load electromotive force of PMSG

物理量	计算值 U/V		试验值 U/V	设计要 求值 U/V	与试验值 误差/%	与要求值 误差/%
	静态	瞬态				
E_0 的均方根	432.9	424.0	453.1	4 400	-6.4	-3.6
E_0 的基波	417.5	410.6	435.5	422.9	-5.87	-2.9
E_0 的3次谐波	106.6	99.3	103.4	—	—	—
E_0 的5次谐波	38.5	33.84	34.4	<42.3	-1.83	符合要求
E_0 的7次谐波	13.2	9.7	8.55	<12.7	13.45	符合要求

4 实验结果与分析

发电机组装完成后，在实验室构建永磁直驱风力发电机实验平台，即鼠笼式异步电机带动齿箱拖动永磁风力发电机。发电机的气隙狭小，不便进行磁场测量，因此本文仅进行了额定转速的空载拖动实验，使用Fluke1750电能质量测试仪测量发电机的电压，得到表4所示的基波及谐波具体数据。

5 结论

1) 静态磁场的气隙磁通密度为带有锯齿的梯形波，其最大值为 0.78 T ，定子铁心齿部磁密在 1.5 T 到 1.6 T 之间，磁密局部最大值为 1.857 T 。

2) 对静态磁场的气隙磁密波形进行傅里叶变换，求出了基波及3、5、7次谐波，计算了基波空载电势，计算值和实际值较吻合，该电机的空载3次谐波较大。

3) 比较静态和瞬态磁场可知：瞬态场计算结果略小于静态场，计算的结果均在允许的误差范围内。

4) 静、瞬态计算的误差可能是由不同计算方法、网格划分等原因引起的，且误差完全在允许范围之内。计算值较试验值偏小的原因很多，本文认为很可能是有限元计算采用了磁钢技术文件中所要求矫顽力的下限，因此计算结果相当保守，产生了较大的负偏差。

致 谢

本文的研究得到了金风科技公司的帮助，谨此致谢。

参考文献

- [1] 徐锋, 王辉, 杨韬仪. 兆瓦级永磁直驱风力发电机组交流技术[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7): 57-61.
Xu Feng, Wang Hui, Yang Taoyi. Research on power conversion technique in MW-level direct-driven wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 57-61(in Chinese).
- [2] 陈巨涛, 郭焱, 郑华耀. 船舶电力推进三相永磁同步电机数学模型和仿真[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 34-37.
Chen Jutao, Guo Yi, Zheng Huayao. Mathematical models and simulation of marine electric propulsion double 3-phase permanent magnet synchronous machine[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 34-37(in Chinese).
- [3] 雷亚洲, Lightbody G. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 27-32.
Lei Yazhou, Lightbody G. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 27-32(in Chinese).
- [4] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 14-17.
Li Jing, Wang Weisheng, Song Jiahua. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 14-17(in Chinese).
- [5] 郭金东, 赵栋利, 林资旭, 等. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 1-6.
Guo Jindong, Zhao Dongli, Lin Zixu, et al. Research of the megawatt level variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 1-6(in Chinese).
- [6] 姚骏. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.
Yao Jun. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15(in Chinese).
- [7] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.
Yin Ming, Li Gengyin, Zhang Jiancheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65(in Chinese).
- [8] Xie Dexin, Yan Xiuke, Zhang Yihuang. A direct field-circuit-motion coupled modeling of switched reluctance motor[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2004, 40(2): 573-576.
- [9] 严登俊, 刘瑞芳, 胡敏强, 等. 处理电磁场有限元运动问题的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 163-167.
Yan Dengjun, Liu Ruifang, Hu Minqiang, et al. A new method to deal with the motion problem in electromagnetic field finite element analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 163-167(in Chinese).
- [10] 夏永洪. 同步发电机空载电压计算方法比较[J]. 微电机, 2006(7): 4-6.
Xia Yonghong. Calculating no-load harmonic voltage of synchronous generators[J]. Small & Special Electrical Machines, 2006(7): 4-6(in Chinese).
- [11] 吴新振, 王祥珩, 罗成. 多相异步电机谐波电流与谐波磁势的对应关系[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(7): 865-868.
Wu Xinzhen, Wang Xiangheng, Luo Cheng. Relationship between harmonic currents and harmonic magneto-motive forces in multi-phase induction machines[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2005, 45(7): 865-868(in Chinese).
- [12] 乔鸣忠, 魏建华, 叶红春. 考虑定子斜槽及转子运动的外转子无刷直流电机数值计算[J]. 大电机技术, 2006(2): 38-41.
Qiao Mingzhong, Wei Jianhua, Ye Hongchun. Calculation of exterior rotor BLDCM considering skewed stator slot and rotor movement[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2006(2): 38-41(in Chinese).
- [13] 龚建芳. 定子斜槽、非均匀气隙对永磁同步发电机的性能[J]. 大电机技术, 2008(4): 17-20.
Gong Jianfang. The influence of skew width & non-uniform air-gap on PMSM's performance[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2008(4): 17-20(in Chinese).
- [14] 刘长红, 杨平西. 定子斜槽同步发电机空载电压波形的数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(11): 1892-1895.
Liu Changhong, Yang Pingxi. The numerical calculation of voltage waveform of synchronous generator with skewed slots[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(11): 1892-1895(in Chinese).
- [15] 黄劭刚. 同步发电机空载电压波形的齿磁通计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 135-138.
Huang Shaogang. Tooth flux method of calculation no-load voltage waveform of synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 135-138(in Chinese).
- [16] Chang E K, Sykulski J K. Harmonic analysis of output voltage in synchronous generator using finite-element method taking account of the movement[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2002, 38(2): 1249-1252.
- [17] 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.
Sun Yuguang, Wang Xiangheng, Gui Lin, et al. Transient calculation of stator's internal faults in synchronous generator using FEM coupled with multi-loop method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 136-141(in Chinese).
- [18] 夏长亮. 同步发电机定子绕组内部故障数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 124-129.
Xia Changliang. Numerical analysis of stator winding faults in synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 124-129(in Chinese).



何山

收稿日期: 2009-09-22.

作者简介:

何山(1974—), 男, 博士研究生, 讲师, 从事电机及洁净能源方面的研究工作, E-mail: heshanxju@yahoo.com.cn;

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护、计算机工业控制、风力发电控制等;

张新燕(1964—), 女, 教授, 从事风力发电控制等方面的研究工作。

(责任编辑 杜宁)