

不对称负载对汽轮发电机磁场畸变及功角的影响

戈宝军, 张 泽, 韩继超, 陶大军, 赵洪森, 王立坤

(哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:大型汽轮发电机是电力系统的重要组成部分,其稳定性直接影响了电力系统的安全运行。在建立二维电磁场时步有限元模型的基础上,对一台1 407 MVA 汽轮发电机的空载、额定负载及不对称负载运行工况进行深入研究。分析了汽轮发电机不同运行工况下磁场的变化,给出了发电机负载不对称工况下磁密偏移角度的计算方法,通过磁密偏移角度来定量的研究发电机磁场畸变的变化规律。研究了在汽轮发电机负载不对称工况对应的不同负序含量下发电机内功率因数角及功角的变化规律。研究结果表明汽轮发电机在带不对称负载时,不仅磁场发生偏移与畸变并且内功率因数角、功角均随负载不对称发生相应变化,得出的仿真结果与理论分析结果相一致,为发电机在负载不对称工况下磁场的研究及故障判断提供一定的理论基础。

关键词:汽轮发电机; 不对称负载; 磁密偏移; 功角

DOI: 10. 15938/j. jhust. 2018. 03. 015

中图分类号: TM311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0086-05

Influence of Asymmetrical Loads on Magnetic Field Distortion and Power Angle of Turbo-generator

GE Bao-jun, ZHANG Ze, HAN Ji-chao, TAO Da-jun, ZHAO Hong-sen, WANG Li-kun

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Large turbo-generator is an important part in power systems and its stability directly affects the safe operation of the power system. On the basis of establishing two-dimensional electromagnetic field-circuit-motion coupled time-stepping finite element model, the no-load condition, rated load condition, and asymmetric operation condition of a 1407MVA turbo-generator was further studied in the paper. Firstly, the paper analyzes changes in different conditions and definition calculation method of flux density deviation angle under asymmetrical load of generator. The variation law of the generator magnetic field is studied by the flux density deviation angle. The inner power factor and power angle are calculated under the condition of asymmetric load operation. The paper analyzes the change of inner power factor and power angle. The result indicated that turbo-generator not only the magnetic field displacement happened but also the change of inner power factor, power angle happened. The simulation results are consistent with the theoretical analysis. Therefore, it provides with certain theoretical basis for asymmetric operation condition and fault judgment of the generator.

Keywords: turbo-generator; asymmetric load; flux density deviation; power angle

收稿日期: 2016-06-23

基金项目: 黑龙江省青年科学基金(QC2016066); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017080); 国家自然科学基金(51407050)。

作者简介: 戈宝军(1960—),男,教授,博士研究生导师;

张 泽(1989—),男,硕士研究生。

通信作者: 韩继超(1986—),男,讲师, E-mail: hanjichao163@163.com.

0 引言

发电机在运行过程中,不可避免地会产生三相不对称情况。在正常额定工况下,发电机电枢绕组中感应出三相对称的正序稳态电流供给电力系统,对称的正序电流产生的磁场为一同步转速旋转的正序旋转磁场^[1]。但发电机在运行过程中不可避免地会出现不对称运行情况。当汽轮发电机在不对称工况运行时,定子绕组中将会产生负序电流^[2]。汽轮发电机的气隙磁场决定电动势波形的变化,而电机内部磁场的变化受到负序分量的影响。在负序分量影响下,负序电流在气隙中产生负序旋转磁场^[3]。当电力系统接有大容量单相冶炼炉、使用电气牵引机车等不对称负载,或是由于某种原因出现的短路、非全相运行等状态时,都会造成发电机不对称运行。国内对发电机不对称工况下产生的问题进行了深层次的研究,高云鹏等学者分析了外部不对称短路故障,不仅对发电机在故障工况下产生的负序电流以及瞬态负序分量进行了理论研究与分析,并且利用软件仿真分析了三种故障下产生的不同负序电流对发电机的影响,对相间短路故障时瞬态负序分量也进行了详细的分析,做出了对故障时的短路电流与转子瞬时发热的内在联系的总结^[4-6]。R. Krok 在文[7]中分析了当电机在负载不对称工况下运行时,电机转子的温度场的分布情况。Pantelyat M G 等学者对汽轮发电机运行时模型的建立与边界条件的确定进行了大量研究,分析了阻尼条对汽轮发电机负序运行的影响,对汽轮发电机两相短路工况的转子表面的涡流损耗进行了分析^[8-9]。

对于汽轮发电机不对称工况下磁场特性进行的研究表明发电机在负载不对称运行时存在磁场畸变现象。文[10-11]指出发电机在某些运行工况下,磁力线不仅会斜穿气隙而且斜穿定子槽和转子槽,发生磁场畸变现象,并且功角越大磁场畸变越明显。文[12]定义了等效气隙长度来描述磁场畸变的程度。文[13]指出磁场畸变还包括磁路等效导磁面积的变化,从而整个磁路的等效磁导发生变化。

本文建立发电机二维电磁场—电路—运动耦合时步有限元模型,得到发电机在空载、额定负载及不对称负载工况下的运行参数,计算了磁密基波幅值轴线偏移发电机d轴的角度,通过研究磁密偏移角度来定量地分析磁场变化在电机内部的影响,计算

发电机在不对称负载工况下的内功率因数角、功角并研究其变化规律。

1 汽轮发电机不对称运行工况下磁场特性的分析与模型的建立

1.1 汽轮发电机的磁密偏移角度分析

汽轮发电机运行在不对称工况时,汽轮发电机内的磁场产生了变化。为了研究汽轮发电机不同半径处合成磁场偏移磁场基准轴的角度,现取发电机不同半径位置的径向磁密,并对气隙不同半径处进行了细分,通过谐波分解,确定相应的基波幅值位置以发电机d轴为基准轴,分别定量的测量发电机磁密幅值轴线在不同工况下的偏移角度 θ ,如图1和图2所示。

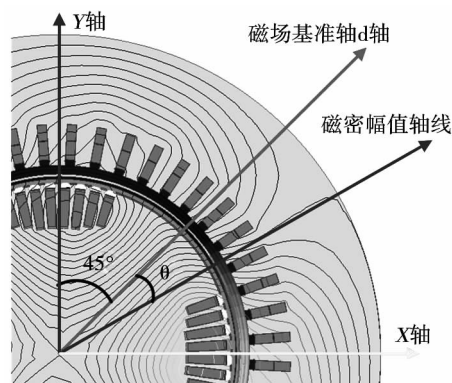


图1 汽轮发电机磁密幅值轴偏移角度空间表示

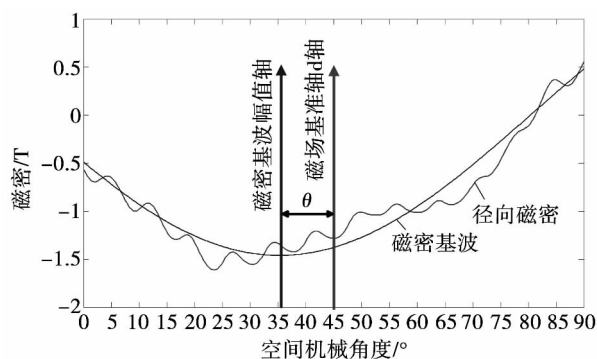


图2 汽轮发电机磁密偏移角度定量表示

发电机达到稳定运行时,磁场随转子的转动呈现周期性的变化规律,本文研究磁密偏移d轴的角度,故取发电机达到稳定的任意时刻即可,由于方便计算,本文取2.9 s时的运行时刻来定量的研究磁密偏移。

1.2 汽轮发电机的结构参数和物理模型

对发电机额定运行以及带不对称负载的情况分

别进行计算,在分析电机磁场时考虑定、转子材料的饱和非线性以及转子槽型结构。本文涉及汽轮发电机的相关参数如表1所示。同步发电机的物理结构如图3所示。

表1 汽轮发电机的相关数据

序号	项目	单位	设计值
1	额定容量	MVA	1 407
2	额定功率	MW	1 266.3
3	额定电压	kV	24
4	定子额定电流	A	33 847
5	额定频率	Hz	50
6	额定励磁电流	A	9 265
7	空载额定励磁电流	A	3 295

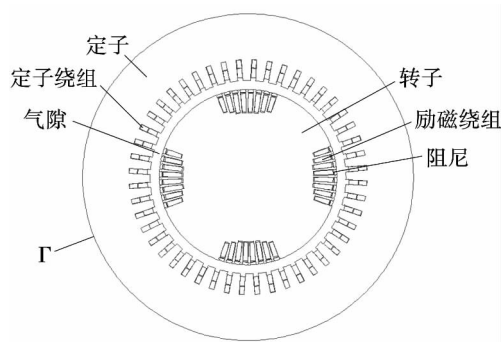


图3 汽轮发电机物理结构图

1.3 汽轮发电机场路耦合数学模型的建立

根据汽轮发电机的基本尺寸建立发电机二维有限元模型,以瞬态场方法进行求解,以定子外圆作为求解区域外边界。在满足工程实际运行的情况下,做出如下假设^[14]:

1) 沿电机轴向的磁场分布视为不变,因此发电机可以等效为二维场模型来处理;

2) 位移电流忽略不计;

3) 在求解区域里矢量磁位 A_z 所表述的瞬态电磁场边值问题为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) &= -J_z + \sigma \frac{dA_z}{dt} \\ A_z|_{\Gamma} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: A_z 为 Z 轴方向上的矢量磁位; J_z 为 Z 轴方向上的矢量磁位源电流密度; ν 为磁阻率; σ 为材料的电导率; Γ 为定子铁芯外表面,如图3所示。

2 汽轮发电机二维有限元电磁场仿真结果的分析

2.1 发电机空载运行

发电机空载运行时磁场分布如图4所示。

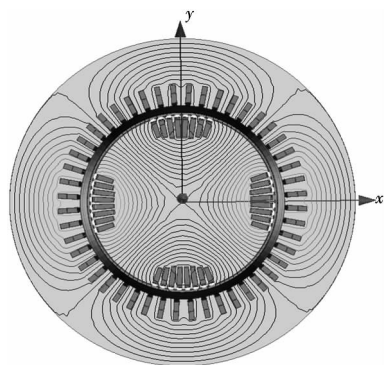


图4 发电机空载运行时磁场分布

发电机空载运行时,由于没有电枢反应的影响,发电机磁场分布均匀,气隙径向磁密对称,现取发电机不同半径位置的径向磁密,通过谐波分解,确定相应的基波幅值位置,以磁场分布的对称轴 d 轴为基准轴,分别测量发电机在不同半径处磁密偏移 x 轴的角度如图5所示。

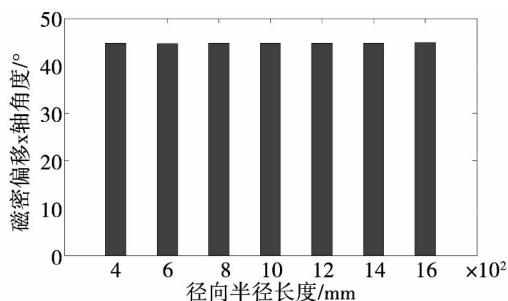


图5 发电机空载运行时磁密偏移 x 轴角度

由图5可以看出,发电机空载运行时偏移角度基本相等,几乎都与 d 轴重合,偏移角度不超过 0.2° ,偏移程度不超过 0.5%。所以空载运行时不同半径处的磁密均以对称轴均匀分布,仿真结果与理论结果相一致。

2.2 发电机额定负载运行

发电机额定负载运行时磁场分布如图6所示。

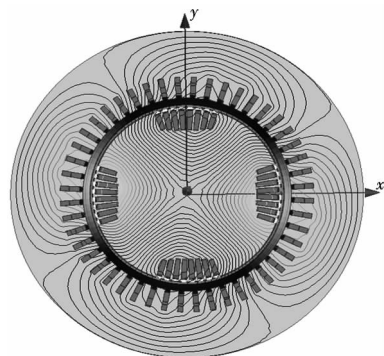


图6 发电机额定负载工况下磁场分布

发电机额定负载运行时,由于电枢反应的影响,发电机磁场分布不再完全对称,现取发电机不同半径处位置的径向磁密,通过谐波分解,求得 2.9 s 时发电机不同半径位置处磁密偏移角度如图 7 所示。对发电机气隙处位置进行细分,求得气隙处不同径向位置的磁密偏移角度如图 8 所示。

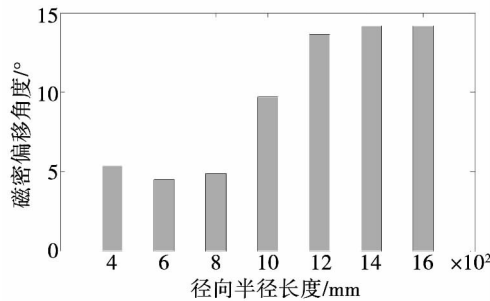


图 7 发电机额定负载运行时不同半径处磁密偏移角度

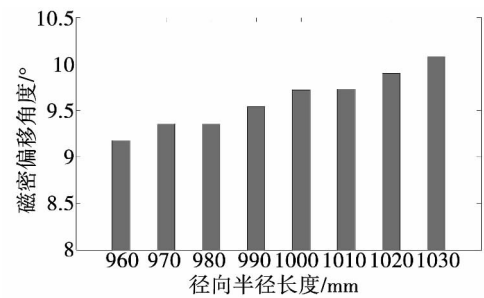


图 8 发电机额定负载运行时气隙处磁密偏移角度

发电机额定负载工况运行时磁密发生偏移,偏移角度在气隙处随着径向半径长度的增加而逐渐增大。这是由于电枢反应的影响,气隙处的磁场是由主磁场和电枢合成磁场共同作用产生的,径向半径长度越大距离定子处越近,电枢合成磁场的作用越明显,产生较大的偏移角度。

2.3 发电机不对称负载运行

如图 9 所示,为发电机单相不对称运行工况原理图。其中 x (为了便于叙述后文简述为 B 相负载系数) 为等效系数。 $x=1$ 时发电机的三相负载对称且为额定等效阻抗负载,上文已经给出结果;其他情况为发电机处在不对称运行工况。

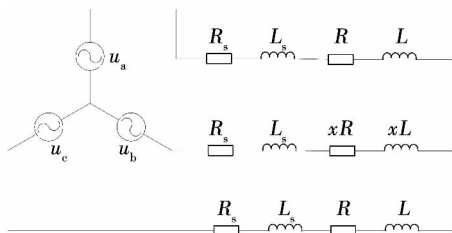


图 9 发电机不对称运行工况示意图

通过改变 B 相负载系数, x 分别取 0.9、0.7、0.5、0.3 和 0 进行计算。A、C 相负载不变,进行有限元仿真计算发电机单相不对称负载运行并得出结果,发电机在不同负载工况时磁密偏移角度发生变化如图 10 所示,具体数据如表 2。在气隙处,不同负载工况下磁密偏移角度发生变化如图 11 所示。

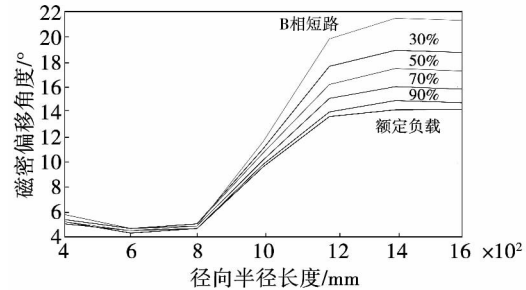


图 10 发电机 B 相负载不对称时磁密偏移角度

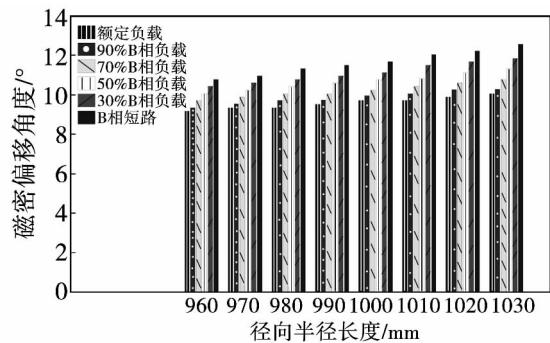


图 11 发电机 B 相负载不对称时气隙处磁密偏移角度

表 2 发电机负载不对称工况时磁密偏移角度(°)

半径/mm	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600
空载	0.18	0.30	0.19	0.18	0.17	0.17	0.01
额定负载	5.39	4.50	4.87	9.72	13.68	14.22	14.22
90% B 相	5.21	4.68	4.86	9.9	14.04	14.94	14.76
70% B 相	5.942	4.86	5.05	10.26	15.12	16.02	15.84
50% B 相	5.94	4.87	5.23	10.80	16.20	17.46	17.28
30% B 相	5.57	4.86	5.23	11.16	17.64	18.90	18.72
B 相短路	5.39	4.68	5.05	11.70	19.81	21.42	21.25

3 发电机负载不对称工况下内功率因数角、功角的计算与规律分析

发电机不对称运行时,定子电流和电压中的基频交流分量三相不对称,需排除负序分量和零序分量对发电机内功率因数角和功角的影响,从而计算正序分量下发电机的内功率因数角及功角,利用对称分量法可以把正序分量分离出来。如图 12 所示,

以三相不对称电流为例,可分解为正序电流、负序电流和零序电流。

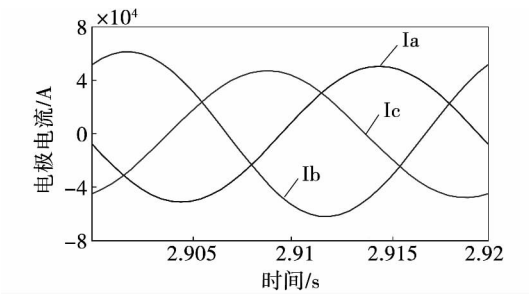


图12 发电机不对称运行时产生的三相不对称电流

令
$$\left. \begin{aligned} a &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ a^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

三相不对称电流向量 $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$ 和 $\dot{I}_c$ 与对称分量法分解出来的正序电流相量 $\dot{I}_+$ 、负序电流相量 $\dot{I}_-$ 和零序电流相量 $\dot{I}_0$ 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_+ \\ \dot{I}_- \\ \dot{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过改变B相负载系数,其他相不变,来计算发电机负载不对称工况下的内功率角和功角如表3所示。

表3 发电机不同工况时内功率因数角和功角

负载含量	负序电流含量/%	内功率因数角/ $^\circ$	功角/ $^\circ$
额定负载	0.17	67.5	41.66
95% B相	1.45	67.64	41.79
90% B相	2.95	68.06	42.20
85% B相	4.49	68.35	42.50
80% B相	6.08	68.66	42.81
75% B相	7.72	68.99	43.14
70% B相	9.40	69.20	43.35
65% B相	11.15	69.68	43.83
60% B相	12.95	70.05	44.20
55% B相	14.81	70.43	44.58

从表格3的数据上可以看出,当改变B相负载时,发电机三相电流负序含量、内功率因数角和功角

均发生明显变化,具体变化规律如图13和图14所示。

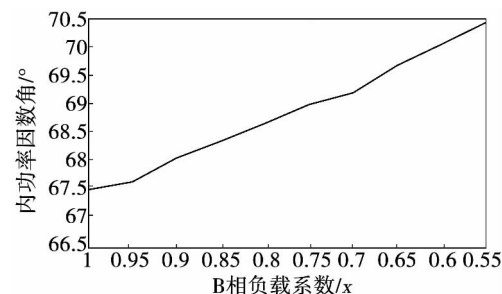


图13 发电机不对称负载运行时内功率因数角的变化

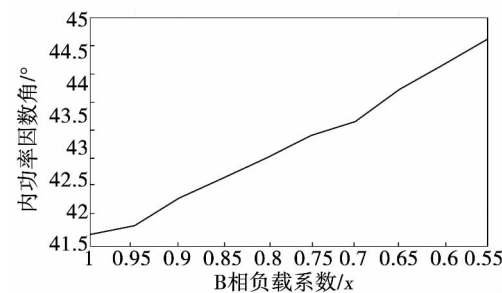


图14 发电机不对称负载运行时功角的变化

从图13和图14中可以看出,发电机在额定工况下内功率因数角为 67.5° ,功角为 41.66° 。随着负载系数 x 从1开始逐渐减小,发电机的负载增大,发电机输出功率增大,功角也相应增大,因为外电路中电阻和电感成比例的一同变化,所以功率因数角基本不变,功角的变化对内功率因数角的变化起主导作用,所以内功率因数角也增大。

4 结 论

本文以1407 MVA汽轮发电机为例,给出了磁密偏移角度的计算方法,通过有限元仿真和计算得出了发电机在空载、额定对称负载和不对称负载时磁密偏移角度、内功率因数角和功角并得出以下结论:

- 1) 发电机在额定负载及不对称负载工况下磁密偏移角度随着转子到定子径向距离的增加而逐渐增大,并且在气隙附近偏移角度增加明显。
- 2) 发电机气隙处随着径向长度增加越靠近定子处磁密偏移角度越大,并随着负载不对称程度的增加磁密偏移角度增大。
- 3) 发电机在不对称负载工况下电枢反应磁场发生明显变化,在定子处磁密产生较大偏移角度,磁密偏移角度正比于负载不对称程度。(下转第98页)

- [7] 张涛,等. 基于频率切片小波变换和支持向量机的癫痫脑电信号自动检测[J]. 物理学报,2016, 65(3): 038703_1-038703_7.
- [8] 王杰,李牧潇,等. 改进的极限学习机在癫痫脑电分类中的应用[J]. 计算机仿真,2014,31(6): 343-346.
- [9] LEE Y, WAHBA G, ACKERMAN S. Classification of Satellite Radiance Data by Multicategory Support Vector Machines [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2004(21): 159-169.
- [10] 张鹏博,王雪,等. 癫痫发作瞬态带宽特征自适应检测方法[J]. 仪器仪表学报,2016,37(6): 1390-1397.
- [11] ZHOU W, LIU Y, et al. Epileptic Seizure Detection Using Lacunarity and Bayesian Linear Discriminant Analysis in Intracranial EEG [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, 60(12): 3375-3381.
- [12] 宋立新,王玉静,等. 基于 Hilbert-Huang 变换的心率变异信号分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(10): 30-34, 186.
- [13] 尹芳,郑亮,等. 基于 Adaboost 的视频文本定位[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(1): 103-108.
- [14] 王鹏,李珊珊,等. 便携式脑电信号实时采集系统[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(1): 77-82.
- [15] 周卫东,赵建林,等. 癫痫脑电信号识别算法及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2010, : 37-38.
- [16] PARVEZ M, PAUL M. Epileptic Seizure Detection by Exploiting Temporal Correlation of Electroencephalogram Signals [J]. Signal Processing, IET, 2015, 9(6): 467-475.
- [17] SONG Y, CROWCROFT J, ZHANG J. Automatic Epileptic Seizure Detection in EEGs Based on Optimized Sample Entropy and Extreme Learning Machine [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2012, 210(2): 132-146.
- [18] 王广泽. 改进粒子群算法在供应链库存控制中的应用[J], 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(5): 90-95.
- [19] BAJAJ V. Classification of Seizure and Nonseizure EEG Signals Using Empirical Mode Decomposition [J]. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 2012, 16(6): 1135-1142.

(编辑: 王 萍)

(上接第 90 页)

4) 发电机在不对称负载工况下随着负载不对称程度和负序电流含量的增加,发电机的内功率因数、功角均增大。

参 考 文 献:

- [1] 汤蕴璆. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 236-238.
- [2] 刘广. 水轮发电机不对称运行转子温度场分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [3] 田志斌. 负序电流及其对汽轮发电机的影响[J]. 山东省电力高等专科学校学报, 1999, 2(3): 66-68.
- [4] 高云鹏. 大型半速汽轮发电机相间短路时瞬态负序分量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [5] 张鹏鹏. 大型半速汽轮发电机不对称短路及其负序分量的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [6] 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.
- [7] KROK R, MIKSIWICZ R. Modeling of Temperature Fields in Turbo generator Rotors at Asymmetrical load [C] // ICEM 2000. Espoo Finland. Helsinki University of Technology, 2000: 1005-1009.
- [8] PANTELYAT M G, SHULZHENKO N G. Finite Element Analysis of Electromagnetic Field and Losses in a Turbogenerator Rotor [C] // Computational Electromagnetics, Albuquerque, NM: 2006: 1-2.
- [9] PANTELYAT M G, BIRO O, STERMECKI A. Electromagnetic Forces in Synchronous Turbogenerator Rotor Slot Wedges [C] // Nonlinear Dynamics and Synchronization (INDS) & 16th Int'l Symposium on Theoretical Electrical Engineering (ISTET). Klagenfurt, Austria: IEEE, 2011: 1-4.
- [10] 罗应立,张新丽,康锦萍,等. 汽轮发电机非线性特征的机理及其与运行条件的关系[J]. 中国电机工程学报, 2008, 27(12): 1-6.
- [11] 罗应立,蒙亮,刘晓芳,等. 汽轮发电机双因素非线性特性的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 1-5.
- [12] 张新丽,罗应立,康锦萍,等. 汽轮发电机内部非线性特征的定量表述. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 1-6.
- [13] 康锦萍,刘晓芳,罗应立,等. 汽轮发电机磁路饱和与磁场畸变共同作用对运行的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36): 41-45.
- [14] 陈贵清,杨翊仁. 水轮机组不对称运行时扭转双重强迫共振[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(6): 633-636.

(编辑: 温泽宇)