

# Finite Element Simulation of Electromagnetic Properties for 300 MW Turbogenerator

Yi Zhang, Shuquan Zhang, Cai Chen, Huijuan Liu

Electrical Engineering Institution, Beijing Jiaotong University, Beijing  
Email: [14121512@bjtu.edu.cn](mailto:14121512@bjtu.edu.cn), [tjzhshq@163.com](mailto:tjzhshq@163.com), [hjliu@bjtu.edu.cn](mailto:hjliu@bjtu.edu.cn), [13121387@bjtu.edu.cn](mailto:13121387@bjtu.edu.cn)

Received: May 20<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jun. 2<sup>nd</sup>, 2015; published: Jun. 9<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In this paper, no-load characteristic, short-circuit characteristic and air-gap flux density, EMF, electromagnetic torque and core losses of a 300 MW turbogenerator are calculated and presented by using the Ansoft Maxwell finite element software. The core loss distributions in stator yoke along radial are simulated by using the accurate Bertotti model. All the results can provide theoretical foundation for temperature field calculation and reducing consumption measures, and at the same time provide some references for the further study of unit operation and parallel operation as well as various fault diagnosis of the turbogenerator.

## Keywords

Turbogenerator, Electromagnetic Properties, Electromagnetic Parameter, Finite Element Analysis

---

## 300 MW 汽轮发电机电磁性能的有限元仿真计算

张 毅, 张树权, 陈 财, 刘慧娟

北京交通大学电气工程学院, 北京  
Email: [14121512@bjtu.edu.cn](mailto:14121512@bjtu.edu.cn), [tjzhshq@163.com](mailto:tjzhshq@163.com), [hjliu@bjtu.edu.cn](mailto:hjliu@bjtu.edu.cn), [13121387@bjtu.edu.cn](mailto:13121387@bjtu.edu.cn)

收稿日期: 2015年5月20日; 录用日期: 2015年6月2日; 发布日期: 2015年6月9日

## 摘要

本文利用Ansoft Maxwell有限元软件对一台300 MW汽轮发电机的空载特性、短路特性以及气隙磁密、感应电势、电磁转矩和铁耗等电磁参数进行了计算分析，采用精度较高的Bertotti铁耗模型得到定子轭部铁耗沿径向分布状况，为发电机温度场计算以及降耗措施提供理论依据，同时为进一步研究汽轮发电机单机运行、并网运行及各种故障状态提供参考依据。

## 关键词

汽轮发电机，电磁性能，电磁参数，有限元分析

## 1. 引言

汽轮发电机作为我国电力系统的主要发电机组，其电磁性能对于提高发电系统稳定性和效率有重要的影响作用，随着科技生产力的不断发展，汽轮发电机组的容量日益提高，相应的其温升和损耗也在不断增加，研究其电磁性能可以更好地分析其运行特性以便提升汽轮发电机的效率。目前，国内外计算汽轮发电机电磁性能的方法主要有：采用连续场模型的解析方法和采用离散模型的数值方法，以及以场为基础的齿回路法，但这些方法存在计算时间长或计算精确度低的缺点，随着电机容量和电磁负荷的逐渐增加，这些方法已不能满足计算需求[1]。Ansoft Maxwell有限元计算软件的广泛应用，可以使汽轮发电机电磁参数的计算以及瞬态过程的仿真更加准确。另外，有限元技术为进一步优化发电机结构设计，如为转子侧所采用的偏槽及小槽结构的分析提供了强有力的支持，使汽轮发电机的电磁参数的计算分析提高到了一个新的水平。通过有限元仿真使得电磁参数更加精确，在分析磁场和铁耗分布时得到的结果更加趋于实际情况。本文利用 Ansoft Maxwell 有限元软件对一台 300 MW 汽轮发电机各运行状态进行了有限元分析与计算。

## 2. 电机有限元分析与计算

利用 Ansoft Maxwell 有限元软件分析电机电磁场的主要步骤包括模型建立、材料设置、边界条件和激励源设置，网格剖分，求解和后处理等[2]。

### 2.1. 电机模型

300 MW 汽轮发电机的参数如表 1 所示，电机的二维模型如图 1 所示。其中，电机极数为 2，定子槽数为 54，定子绕组为双层短距绕组，转子槽数为 32，转子槽的排列如图 1 所示为不均匀的分布，其中 28 个槽分配给两个大齿，另外的 4 个槽分别靠近大齿，且比其它槽浅。电机的定子铁芯材料为 DW310-35，转子铁芯采用 26Cr2Ni4MoV 合金钢。电机模型的网格剖分如图 2 所示。为了采用精度较高的 Bertotti 模型研究电机空载和额定负载时定子轭部铁耗分布，在仿真模型中，将定子轭部沿径向均分为 11 等分，将最外层定为第 1 层，依次往内递增 1，最内层为第 11 层，如图 3 所示。定子铁芯材料 DW310-35 在工频 50 Hz 时的损耗曲线，即 B-P 曲线如图 4 所示。

### 2.2. 空载特性

当转子以同步转速 3000 rpm 旋转，定子绕组开路，逐渐增加转子绕组的激励电流，可以得到电机的空载特性曲线如图 5 所示。

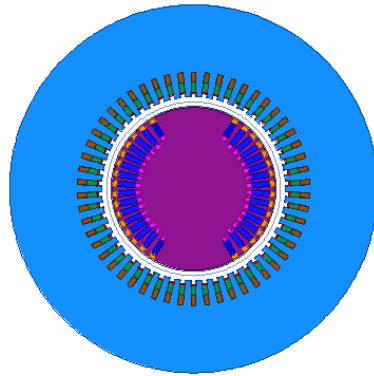


Figure 1. The model of turbogenerator  
图 1. 汽轮发电机模型

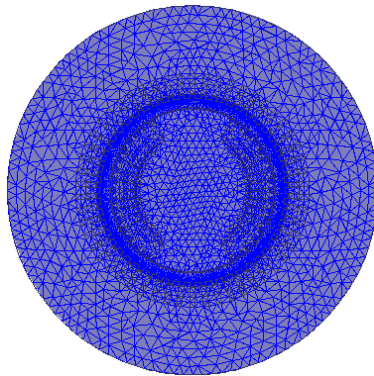


Figure 2. Mesh figure  
图 2. 网格剖分图

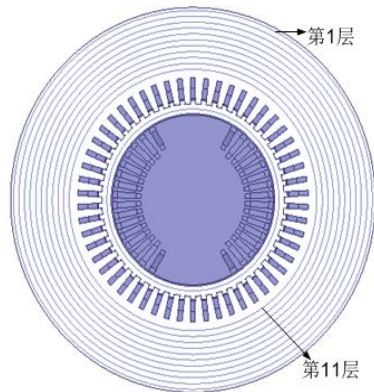


Figure 3. The model of sharing yoke  
图 3. 轭部均分后的模型

当转子绕组激励电流为 987 A 时，电机空载运行的气隙磁密波形为如图 6 所示的平顶波，对该气隙磁密进行谐波分析，得到如图 7 所示的谐波含量图，其中气隙磁密基波的幅值为 0.98 T，由于采用的是短距绕组，节距  $y = 22$ ，因此 5 次谐波含量较少，3 次和 7 次谐波的含量较大，其幅值分别为 0.048 T 和 0.038 T。

电机空载时利用 Ansoft 软件计算的铁耗曲线如图 8 所示，可见，在空载运行时，定子铁耗会维持在 463~464 kW 左右。为了精确计算定子轭部的铁耗分布，利用 Bertotti 模型[3]-[5]，计算图 3 所示的各层

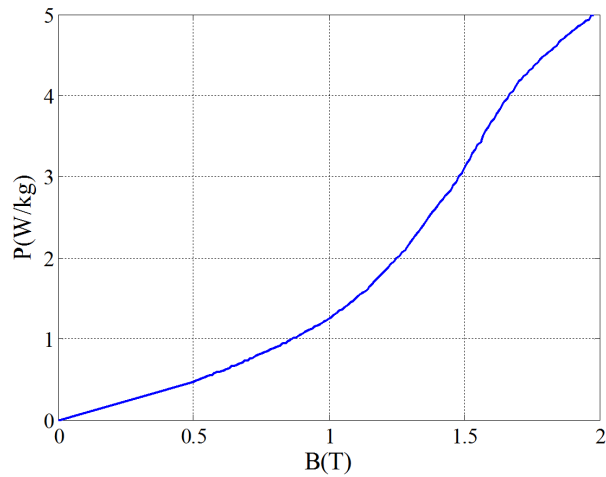


Figure 4. DW310-35 coreloss versus flux density curve (50 Hz)  
 图 4. DW310-35 铁损曲线(50 Hz)

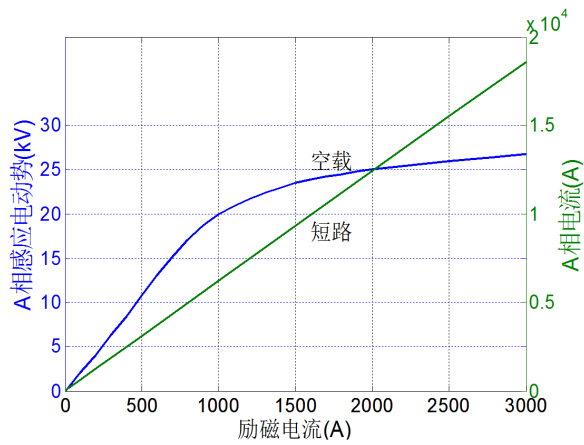


Figure 5. The characteristic curve at no-load and short-circuit condition  
 图 5. 空载与短路特性曲线

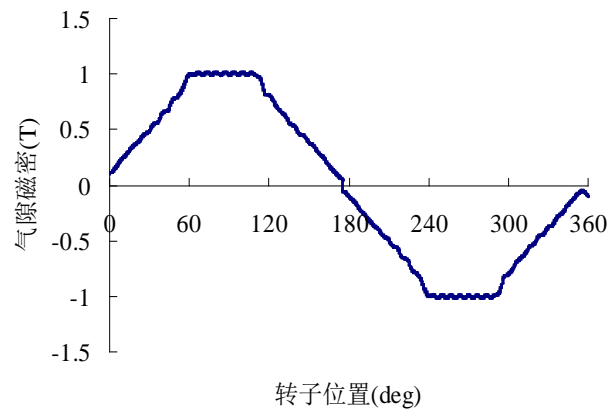


Figure 6. The air gap flux density waveform at no-load condition  
 图 6. 汽轮发电机空载时气隙磁密波形

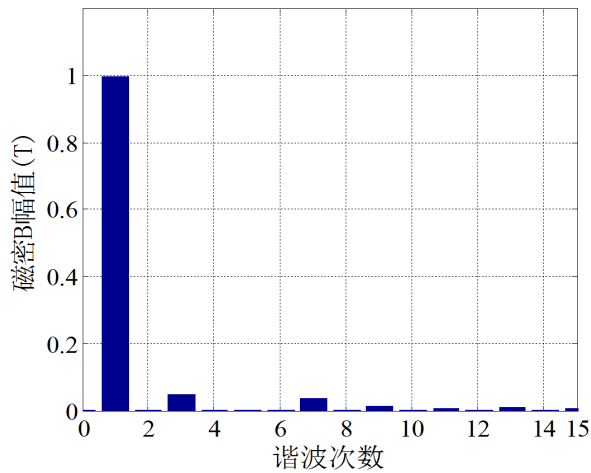


Figure 7. The harmonic contents of the air gap flux density at no-load condition

图 7. 空载时气隙磁密谐波含量

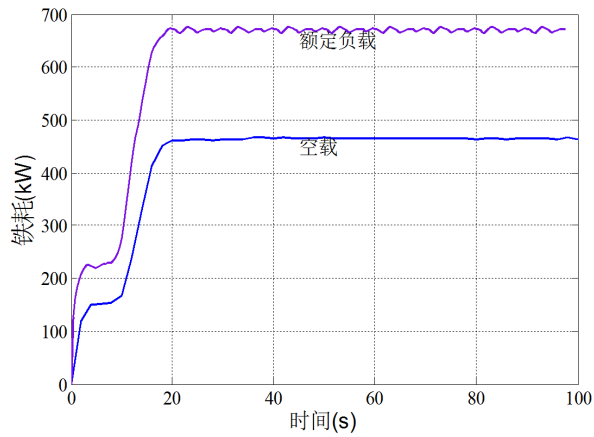


Figure 8. Core loss curve at no-load condition and at the rated operation

图 8. 铁耗曲线

Table 1. Main parameters of turbogenerator

表 1. 汽轮发电机主要参数

定子外径 (mm)	2500	定子内径 (mm)	1250
转子外径 (mm)	1100	单边气隙 (mm)	75
铁芯长度 (mm)	5130	频率 (Hz)	50
定子槽数	54	转子槽数	32
额定电流 (A)	10189	额定电压 (kV)	20
额定转速 (rpm)	3000	功率因数	0.85
空载励磁电流 (A)	987	额定励磁电流 (A)	2510

铁耗值，计算中，需要考虑硅钢片因加工、磁密分布不均匀、磁密波形非正弦及旋转磁化等因素而引起的损耗，引入了损耗增加系数，其中齿部损耗增加系数取为  $k_t = 1.5$ ，轭部损耗增加系数取为  $k_y = 1.3$ 。

该方法利用有限元计算得到的单元面积  $\Delta^e$  和对应的磁感应强度  $B^e$ ，通过下式[6]计算发电机定子齿部和轭部铁心损耗值。

$$p_t = \sum_{i=1}^N p_{it}^e = k_t \times (\sigma_h f + \sigma_e f^2) \times \sum_{i=1}^N \left[ (B_{it}^e)^2 \times G_{it}^e \right] \quad (1)$$

$$p_y = \sum_{i=1}^N p_{iy}^e = k_y \times (\sigma_h f + \sigma_e f^2) \times \sum_{i=1}^N \left[ (B_{iy}^e)^2 \times G_{iy}^e \right] \quad (2)$$

其中,  $N$  为定子铁心总剖分单元数;  $B_{it}^e$  为齿部第  $i$  个单元的磁密幅值;  $B_{iy}^e$  为轭部第  $i$  个单元的磁密幅值;  $G_{it}^e$  为齿部第  $i$  个单元的重量,  $G_{it}^e = \Delta_{it}^e \rho l$ ;  $G_{iy}^e$  为轭部第  $i$  个单元的重量,  $G_{iy}^e = \Delta_{iy}^e \rho l$ ;  $\rho$  为铁心材料密度,  $l$  为定子铁心净长;  $\sigma_h$ ,  $\sigma_e$  为材料常数。在本文中  $\sigma_h = 0.0247$ ,  $\sigma_e = 5.03e^{-005}$  [7]。利用铁耗计算模型得出定子轭部 11 层的铁耗分布如图 9 所示。

从图 9 可以看出在空载运行时汽轮发电机定子轭部铁耗值从外层到内层逐渐增大, 原因是越靠近气隙磁密越大, 铁耗值与磁密幅值的平方值成正比[8], 因此也相应增强, 符合实际情况, 此分布情况也可用于分析温度场的变化。

### 2.3. 短路特性

当电机转子以同步转速 3000 rpm 旋转, 定子绕组短接, 逐渐增加转子绕组的激励电流, 可以得到电机定子绕组电流与转子励磁电流的关系曲线, 即电机的短路特性曲线, 如图 5 中的短路特性所示。由于当电机定子绕组短路时, 电枢磁动势接近于纯去磁性的直轴磁动势, 因此磁路处于不饱和状态, 故短路特性曲线近似为一条直线。从图 5 中可以看出, 当电机定子绕组的短路电流为电机额定电流时, 此时的转子励磁电流约为 1700 A, 电机空载时, 感应电动势达到额定电压时的励磁电流为 987 A, 因此该发电机的短路比约为 0.58, 而设计值为 0.6, 因此, 可知此电机模型与实际电机比较接近。

### 2.4. 交直流电抗的计算

电抗是反映电机内磁饱和程度的参数, 对于隐极同步发电机, 其同步电抗可以通过空载特性和短路特性来获得, 对本文的 300 MW 汽轮发电机, 根据其额定数据可得到其同步电抗值为

$$X_d = \frac{E_0}{I} = \frac{32000}{\sqrt{3} \cdot 10189} = 1.81 \Omega \quad (3)$$

本文利用有限元软件采用转差法来测量并计算  $X_d$  和  $X_q$ 。将电机转子转速设为 2970 rpm, 即接近但

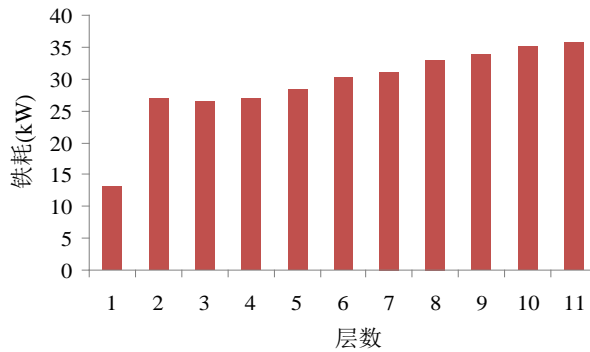


Figure 9. Distribution of yoke coreloss at no-load condition  
图 9. 空载轭部铁耗分布图

不等于同步转速，转差率为 0.01，励磁绕组开路，定子绕组施加 50 Hz 三相对称交流电流，电流幅值为 100 A，当定子旋转磁场与直轴重合时，此时计算出的电抗为直轴电抗  $X_d$ ，当定子旋转磁场与交轴重合时，此时计算出的电抗为交轴电抗  $X_q$ 。

有限元仿真计算出 A 相磁链波形如图 10 所示。磁链呈包络线形状，由于是隐极电机，因此其交、直轴磁链几乎相等，若是凸极电机，其磁链包络线形状则会更加明显。由  $\psi = Li$ ， $X = \omega L$  可以推出  $X_d$  和  $X_q$ 。从图 10 可以读出： $\psi_d = 0.56$  Web， $\psi_q = 0.54$  Web，则  $L_d = 0.0056$  H， $L_q = 0.0054$  H，因此  $X_d = 1.758 \Omega$ ， $X_q = 1.696 \Omega$ 。根据发电机的额定数据，可计算出阻抗基值为

$$Z_b = \frac{20000}{\sqrt{3} \cdot 10189} = 1.13 \Omega \quad (4)$$

因此， $X_d^*$  和  $X_q^*$  分别为 155% 和 150%。由于转差法是在磁路不饱和的情况下进行测量的，因此得到的电抗值均为不饱和值。

## 2.5. 额定运行状态的仿真

在仿真发电机额定运行性能之前，首先需要确定发电机转子的初始位置。利用 Ansoft Maxwell 软件，可以通过堵转运行的仿真计算来确定转子初始位置角，或者通过改变定子电流的初相位，计算出发电机的转矩随定子电流初相位角变化的曲线，以此来确定转子初始位置角[9]。本文通过堵转运行的仿真计算，得到如图 11 所示的发电机转矩随转子位置角变化的曲线，从中可确定转子初始位置角为 103.33 度，且发电机转矩随转子位置角呈正弦规律变化，与发电机的功角特性曲线类似，发电机的最大转矩可以达到 1300 kNm。

在确定发电机的转子初始位置后，给发电机的转子绕组加额定励磁电流(2510 A)，转子转速为 3000 rpm，定子绕组加频率为 50 Hz、有效值为 10,189 A 的三相对称交流电流时，发电机处于额定运行状态。图 12 和图 13 为发电机在额定状态时的磁力线分布图和磁密云图。

图 14 为额定运行时的气隙磁密波形，与空载时的气隙磁密波形相比可知，额定运行时的气隙磁密波形近似为正弦波，且由于电枢反应的作用，使得负载时的磁密波形相对于电机直轴发生了偏移。图 15 为额定运行时气隙磁密的谐波含量图，可见，其基波幅值为 1.45 T，3 次和 5 次谐波含量较大，其幅值分别为 0.13 T 和 0.06 T，5 次以上谐波含量较少。

图 16 为发电机在额定运行时的定子绕组三相感应电动势波形。根据发电机的额定数据  $U_N = 20$  kV，

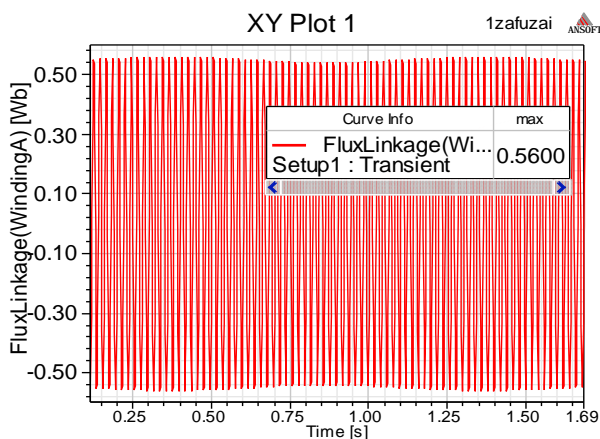


Figure 10. The flux linkage waveform of stator winding A

图 10. 定子绕组 A 相磁链波形



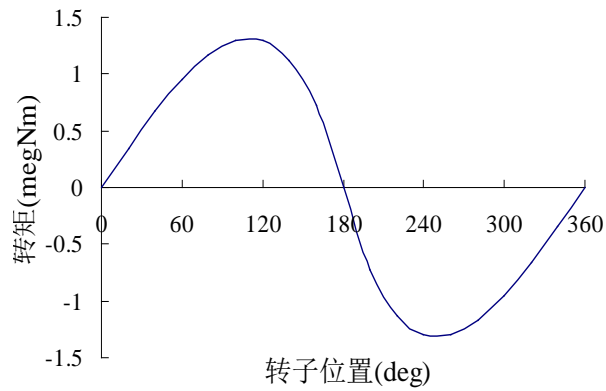


Figure 11. The torque versus rotor position curve  
图 11. 转矩与转子位置曲线

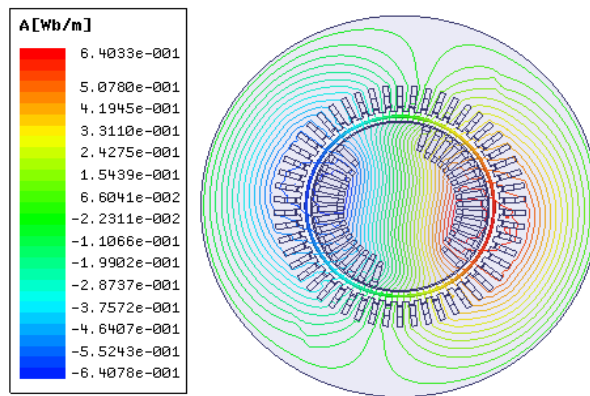


Figure 12. Distribution of magnetic lines at the rated operation  
图 12. 磁力线分布图

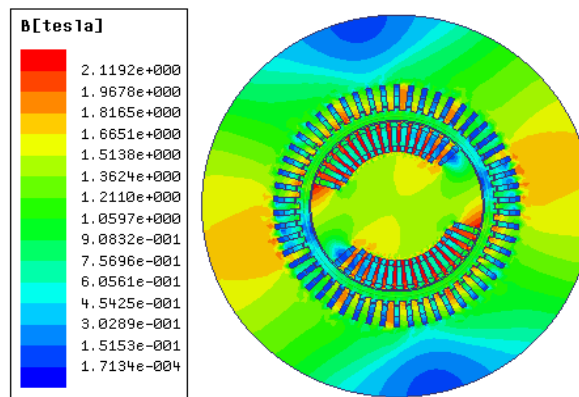


Figure 13. Flux density at the rated operation  
图 13. 磁密云图

$I_N = 10189 \text{ A}$ , 定子绕组为双 Y 连接, 由隐极同步发电机的相量图可知  $\dot{E} = \dot{U} + jX_s \dot{I}$  [10], 可以计算出发电机的感应电动势  $\dot{E} = 24.57 \angle 42.38^\circ$ , 即额定状态下的感应电动势有效值应为 24.57 kV, 其幅值为 34.74 kV, 而从图 16 中可读出发电机感应电动势的幅值为 34.57 kV, 有限元仿真计算值与发电机的设计值基本一致。



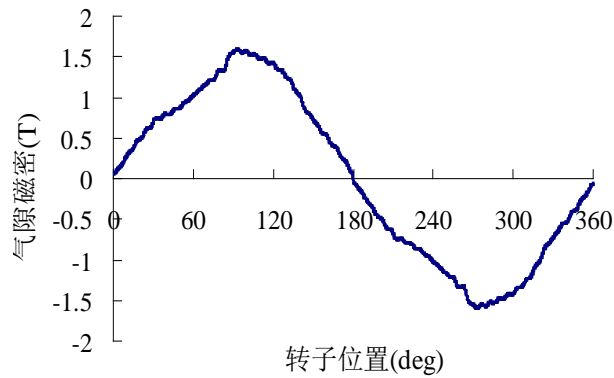


Figure 14. The air gap flux density waveform at the rated operation

图 14. 额定运行时气隙磁密波形

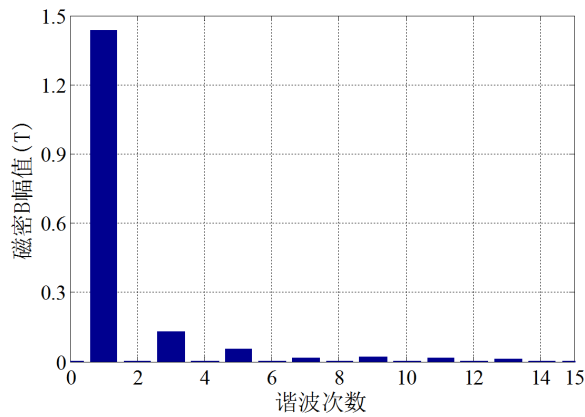


Figure 15. The harmonic contents of the air gap flux density at the rated operation

图 15. 额定运行时气隙磁密谐波含量

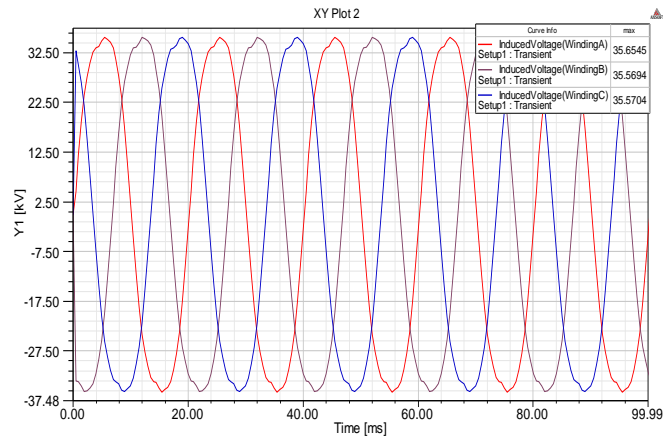


Figure 16. EMF waveform at the rated operation

图 16. 感应电动势曲线图

发电机额定运行时的转矩曲线如图 17 所示，从图中可得到转矩的平均值为 949.15 kNm。利用发电机的额定数据可计算出额定转矩的理论值为：

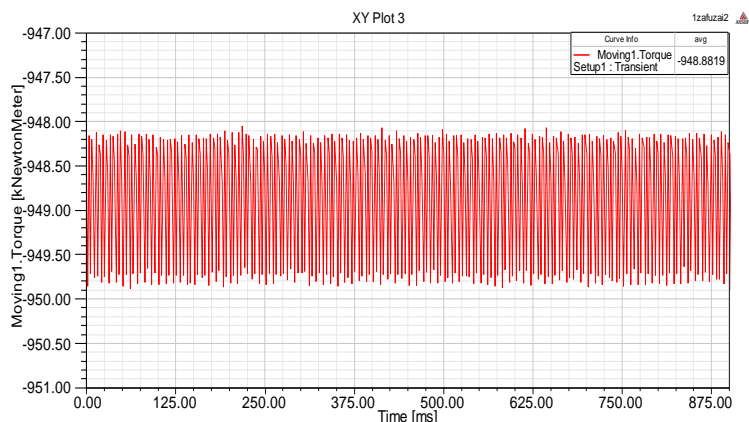


Figure 17. Torque waveform at the rated operation

图 17. 转矩曲线

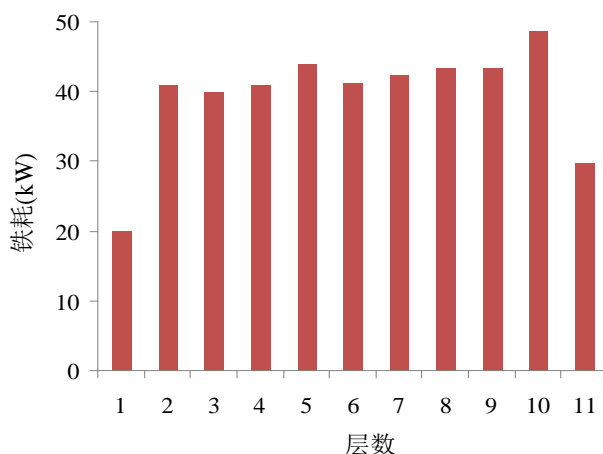


Figure 18. Distribution of stator yoke coreloss at the rated operation

图 18. 额定运行定子轭部铁耗分布图

$$T = \frac{P}{\Omega} = 955 \text{ kNm} \quad (5)$$

可见发电机转矩的有限元计算值与理论计算值非常一致。

电机额定负载运行时利用 Ansoft 软件计算的铁耗曲线如图 8 所示,可见,该电机在额定负载运行时定子铁耗最终会稳定在 674~676 kW 之间,其铁耗值较大。由图 2 的剖分图可以观察到轭部单元面积,结合磁密分布图可以得到剖分单元对应的磁密值,利用汽轮发电机定子铁耗计算模型(公式(2))计算相应的轭部铁耗,得出定子轭部 11 层的铁耗分布如图 18 所示。由上图看出铁耗值从轭部最外层到最内层逐渐增大,这主要是由于磁密逐渐增大;在齿轭联接处附近由于对应剖分面积减小过多导致铁耗值下降,由此可见,沿径向从外层到内层定子轭部铁耗呈现递增趋势。

### 3. 总结

本文利用 Ansoft Maxwell 有限元软件对 300 MW 汽轮发电机的空载特性、短路特性及额定运行时的各电磁参数进行了计算分析,分析结果表明:1) 利用有限元软件能精确仿真发电机的运行特性,通过对空载特性和短路特性的仿真,计算出发电机的短路比(0.58)与设计值(0.6)的误差为 0.02;通过对发电机额

定运行状态的仿真计算, 仿真出的感应电动势幅值为(34.57 kV)与设计值(34.74 kV)的误差为 0.17 kV; 仿真的转矩(949.15 kNm)与设计值(955 kNm)的误差为 5.85 kNm, 都有很好的一致性。2) 利用 Bertotti 模型可以计算得到空载与额定负载时定子轭部铁耗的分布特点, 即定子轭部外层铁耗低于内层铁耗, 从外层到内层总体上呈现递增趋势。总之, 有限元软件能够精确计算发电机在不同工况下的电磁性能, 为发电机温度场计算和降耗措施的制定提供依据, 同时为进一步研究汽轮发电机单机运行、并网运行及故障状态提供有效的参考依据。

### 参考文献 (References)

- [1] 涂光瑜 (2007) 汽轮发电机及电气设备(第二版). 中国电力出版社, 北京, 1-43.
- [2] 赵博, 张洪亮 (2010) Ansoft12 在工程电磁场中的应用. 中国水利水电出版社. 北京, 130-189.
- [3] Bertotti, G. (1998) General properties of power losses in soft ferromagnetic material. *IEEE Transactions on Magnetics*, **24**, 621-630.
- [4] Nam, H., Ha, K.-H., Lee, J.-J., et al. (2003) A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples. *IEEE Transactions on Magnetics*, **39**, 1472-1475.
- [5] Kaczmarek, R. and Amar, M. (1995) A general formula for prediction of iron losses under nonsinusoidal supply voltage waveform. *IEEE Transactions on Magnetics*, **31**, 2505-2509.
- [6] 胡锦焱 (2012) 大型汽轮发电机电磁参数计算与瞬态过程分析. 硕士论文, 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 哈尔滨, 38-46.
- [7] 崔杨, 胡虔生, 黄允凯 (2006) 硅钢片损耗的分析与计算. 中国电工技术学会, 江苏.
- [8] 刘晓芳, 赵海森, 陈伟华, 顾德军 (2010) 电机铁耗的有限元计算方法研究进展及有待解决的问题. *电机与控制应用*, **12**, 1-6.
- [9] 张景明, 黄劭刚, 陈瑛 (2005) 同步发电机负载时二维电磁场有限元分析. *微特电机*, **6**, 9-10.
- [10] 汤蕴璆, 史乃 (2001) 电机学. 机械工业出版社, 北京, 200-230.