

具有自调节通风性能的大型永磁同步发电机 内流热特性数值研究

朱 敏,丁树业,江 欣,刘 玮

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 为了探究具有自调节通风功能的结构紧凑型大型永磁同步发电机内部流体流变特性及温升分布规律,以一台 6 MW 永磁同步发电机为例,基于电机学和数值传热学理论,结合流-热耦合机理,根据电机实际冷却结构选择一个周期作为求解域,建立三维流体场与温度场耦合分析数学模型及物理模型. 采用有限体积元法对永磁同步电机三维温度场进行数值研究,对发电机定转子铁心、定子绕组与绝缘以及永磁体的温升分布特性进行详细分析. 通过与电机绝缘温升限值的对比分析,验证了其求解方法的合理性以及计算结果的准确性,为永磁同步发电机温升的计算及通风结构的设计提供参考依据.

[关键词] 永磁同步发电机,流-热耦合,三维温度场,有限体积元,数值计算

[中图分类号] TM313 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)01-0001-07

Numerical Study of Internal Flow Thermal Characteristics of Large Permanent Magnet Synchronous Generator with Self-Regulating Ventilation Performance

Zhu Min, Ding Shuye, Jiang Xin, Liu Wei

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to explore the internal fluid rheological characteristics and temperature rise distribution of large compact permanent magnet synchronous generator (PMSG) with self-regulating ventilation function, this paper takes a 6 MW PMSG as an example, bases on the theory of electro-mechanics and numerical heat transfer, combines with the flow thermal coupling mechanism, a period is selected as the solution domain according to the actual cooling structure of the generator, the mathematical model and physical model of the coupling of 3D flow field and temperature field are established. The finite volume element method is used to study the 3D temperature field of PMSG, and the distribution characteristics of stator and rotor core, stator winding and its insulation, and permanent magnet are analyzed in detail. The rationality of the method and accuracy of the calculation results are verified by the comparison with and analysis of the ceiling value of the insulation temperature of the motor. This paper provides reference for the calculation of temperature rise of permanent magnet synchronous generator and the design of ventilation structure.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG), flow-thermal coupling, three-dimensional temperature field, finite volume method, numerical calculation

近年来由于能源匮乏问题日益加剧,各个领域对电机的效率和节能的要求越来越高. 永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)因具有工作效率高、拓扑结构多样^[1]、温升低等优点,在燃气轮发电机^[2]、风力发电^[3-5]和航空航天用主发电机^[6]等诸多场合中得到广泛应用. 然而,由于功率较大, PMSG 运行时会产生一定量的定子铁损、转子及永磁体的涡流损耗,导致电机运行时温升增大,温升过高容易引起永磁体过热而产生不可逆退磁,不利于电机可靠安全运行^[7-9]. 因此,准确详细分析 PMSG 内温度分布情况对电机安全运行变得尤为重要.

目前,国内外专家学者通常采用等效热路法或有限体积元法对永磁同步电机温度场进行分

收稿日期:2018-10-24.

基金项目:国家自然科学基金(51277045)、哈尔滨科技创新人才项目(2016RAXXJ026).

通讯联系人:丁树业,博士,教授,研究方向:电机综合物理场数值分析及特种电机理论. E-mail: dingshuye@163.com

析^[10-11]. 热路法计算便捷,但是忽略了通风道内部粗糙度等因素,使计算温度误差较大^[8]. 李立毅等人对永磁电机三维温度场计算模型中的端部绕组进行等效分层及导热优化,有效降低了电枢绕组的温升水平^[12]. 丁树业等人采用有限元法对永磁同步电机^[9]、永磁风力发电机^[13-14]的温度场进行耦合计算,为中小型永磁同步电机的设计提供了理论参考价值. 张海凤等人利用 STAR-CD 对电机温度场进行仿真模拟,提出在支架与散热管之间填充热硅脂的方案,对电机温升有很大的改善^[15]. Cannistra 等人对感应电机温度场进行仿真模拟,为后期转子温度场研究奠定了基础^[16]. Staton 等人分析了工业感应电机不足以准确预测热性能的原因,为不同结构类型的永磁同步电机的设计算法提供了数据^[17]. Daesuk Joo 等人在有限元法的基础上,提出电磁场与温度场相结合的三维数值分析方法,预测永磁电机绕组温度变化情况^[18].

综上所述,近年来国内外专家学者对永磁电机温度场的研究取得了瞩目的成果,但主要集中在中小型电机定子、转子或绕组单独流热特性分析上,对结构紧凑型具有自调节通风性能的大型永磁电机三维全域流-热耦合场计算方面研究较少. 本文以一台 6 MW 永磁同步电机为例,基于电机学和数值传热学理论,根据电机实际冷却结构建立求解域模型,结合工程实际给出的基本假设,采用有限体积元法对永磁同步电机三维温度场进行数值计算. 在此基础上,对电机重要部件如定转子铁心、定子绕组绝缘以及永磁体的温升分布特性进行了分析,得出了一些在永磁同步发电机设计中可以参考的研究结果.

1 数学模型

本文只考虑永磁电机稳态运行下的温度场分布特性,故进行求解时可将导热方程设为定常项,并假设介质具有各向异性,则三维导热方程如下^[19-20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q_v, \\ \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{s_1} = 0, \\ -k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{s_2} = -\alpha (T - T_f). \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为不同材料沿 x, y, z 轴的导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$); T 为待求温度 ($^{\circ}\text{C}$); q_v 为电机内的总热源值 (W/m^3); S_i 为绝热面; S_o 为散热面; α 为表面散热系数 ($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$); T_e 为电机的环境温度 ($^{\circ}\text{C}$).

发电机内流体流动特性需满足质量、动量及能量三大守恒定律,当流体不可压缩且处于稳定流动状态时,控制方程的通用形式如下^[21-22]:

$$\operatorname{div}(\rho u \varphi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \varphi) + S. \quad (2)$$

展开形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u\varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\varphi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\tau \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tau \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tau \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) + S. \quad (3)$$

式中, ρ 为流体密度 (kg/m^3); φ 为通用变量; S 为源项; F 为扩展变量.

2 求解模型确立

2.1 电机基本参数与通风结构

本文研究的 6 MW 永磁同步电机的基本参数如下: 额定功率为 6 000 kW, 转子级数为 24, 定子槽数为 216, 绝缘等级为 H 级。电机的整体结构如图 1 所示。

发电机主要由机壳、定转子铁心、定子绕组、永磁体、风路挡板、定子绝缘、支撑环以及端盖组成。其采用开路式冷却系统,通风结构为轴-径向混合通风。冷却系统中的风路分为三部分:一部分气体冷却定子端部通过挡风板与机壳间的缝隙流向出口;一部分气体冷却端部绕组后进入定转子间气隙,通过与槽楔充分接触,冷却

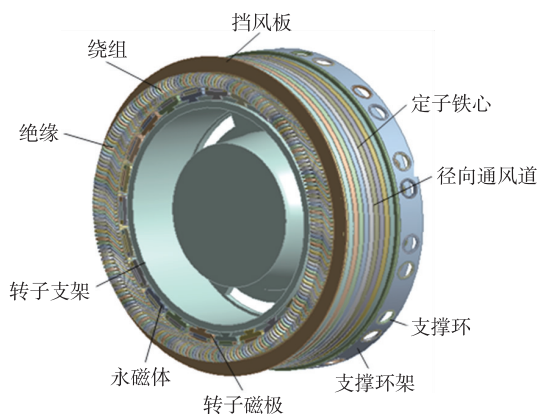


图 1 电机模型

Fig. 1 Generator model

绕组、定转子铁心、永磁体并从定子轭部流向出口;还有一部分气体流经转子支架冷却尾端绕组由支撑环流向出口. 在该种结构的电机中,支撑环孔的大小具有可调节性,调节支撑环孔径可以直接调节进入电机内部冷却空气在电机两端的流量分布,进而改变电机定转子的温升分布特性. 因此,通过合理设置支撑环的截面积可实现该电机冷却性能的自调节功能.

2.2 基本假设与求解域物理模型

为便于电机温度场的求解,根据简化处理的原则,作出以下假设^[23]:

- (1) 只研究电机内流体流速的稳定状态,控制方程不含有时间项;
- (2) 电机定子端部股线采用直线段等效处理;
- (3) 对定子股线绝缘、层间绝缘以及槽楔绝缘等效为一个绝缘体;
- (4) 电机各部分浸漆均匀,绝缘良好;
- (5) 定子上下股线施加相同热源,忽略集肤效应.

根据 PMSG 在轴向及轴向对称的特点,结合传热特性,本文取电机整个轴向长度,周向 1/12 区域作为耦合场的求解域,即周向取 16 个定子槽双层叠绕组作为研究对象. 温度场求解域物理模型如图 2 所示.

2.3 边界条件

求解域内具体边界条件如下:

- (1) 求解域的入口边界为速度入口,入口风速为 1.822 8 m/s.
- (2) 求解域的出口边界为压力出口,压力初始值为一个标准大气压.
- (3) 求解域边界面设为绝热面,机壳外表面设为散热面^[24].
- (4) 转子区域流体与电机额定转速相同,均设置为 290 r/min.

2.4 发电机损耗分布

发电机在额定运行下会产生电磁损耗、机械损耗及杂散损耗. 通过对永磁同步发电机进行电磁计算得到发电机各部分损耗分布,如表 1 所示.

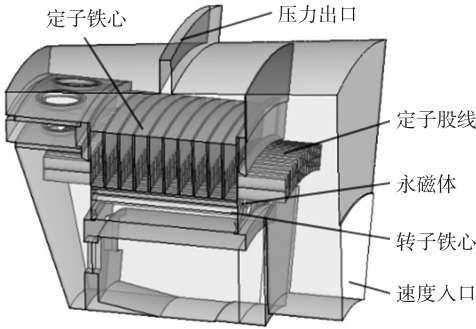


图 2 温度场求解域

Fig. 2 Solved region of temperature field

表 1 发电机损耗

Table 1 Losses of the generator				kW
铜耗	铁耗	机械损耗	杂散损耗	
34.2	21.3	30	30	

3 温度场计算结果与分析

3.1 整体温升分析

基于流-热耦合基本原理对 6 MW 永磁同步电机进行数值计算,图 3 为整个求解域内温升分布.

通过对图 3 分析可知,发电机整体温升分布十分不均匀,定子部分的温升较高,端部绕组及转子部分的温升相对较低. 这是由于空气进入电机内部首先冷却靠近风道入口处的端部绕组,随后进入定转子间的气隙冷却转子铁心与永磁体,此时冷却气体因吸收大量热量导致自身温度升高,故气体经气隙进入定子径向风沟时冷却能力降低,使定子温升较高.

表 2 给出了 PMSG 在额定运行下定子绕组、定转子铁心及永磁体的具体温升值. 从表 2 可见:

- (1) 定子部分温升较高,转子区域偏低,但电机各部分的温升分布比较均匀.
- (2) 最高温升出现在定子股线区域,为 100.36 K;转子区域温升变化梯度较大,最高温升为 96.18 K.

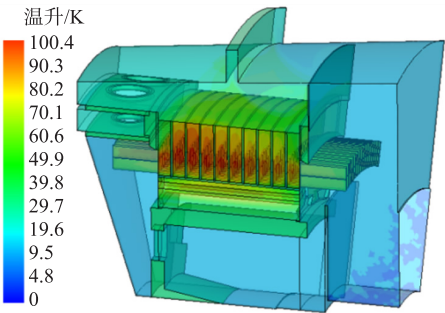


图 3 发电机全域温升分布

Fig. 3 Temperature rise distribution in the whole generator solution region

表 2 永磁同步发电机主要部件温升值

Table 2 Temperature rise of main components of the PMSG				K
部件	最高温升	平均温升	最低温升	
定子绕组	100.36	92.73	39.19	
定子铁心	99.28	81.88	30.28	
转子铁心	96.18	55.23	14.56	
永磁体	96.18	80.67	37.57	

3.2 定子部分温升分析

定子绕组温升作为该发电机最高温升所在区域,其温升的分布特征直接体现了电机的温升限值即绝缘等级的设置,图 4 为定子股线的温升分布云图。由图 4 可知,整体而言,定子股线随着轴向长度的增加呈现出先增大后减小的趋势,温升最大值出现在靠近端部绕组中间位置,为 100.36 K。下层绕组的温升高于上层绕组的温升,靠近入风口的端部绕组温升低于尾部绕组的温升,这是由于空气进入端部气腔首先冷却上层绕组,冷却性能好,随后冷却气体流经转子支架带走转子支架传递的热量,流到尾端端部绕组时气体温度升高,相比于进风处的冷却效果会明显下降。

图 5 给出了定子上下层股线沿轴向温升分布。从图中可见,上下层股线的总体变化趋势基本一致,最大温升处于靠近端部的中间位置,最小温升出现在端部绕组处,上下层绕组最大温差为 10.17 K。

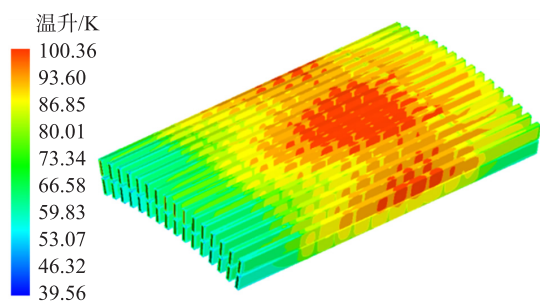


图 4 定子股线温升分布

Fig. 4 Temperature rise distribution of the stator strands

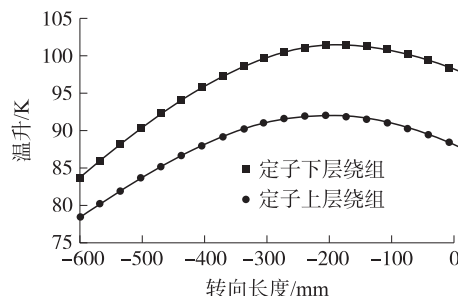


图 5 上下层股线沿轴向温升分布

Fig. 5 Temperature rise distribution of upper and lower layers along axial direction

图 6 为定子绝缘的温升分布。由图 6 可见,绝缘的温升变化趋势与定子上、下层绕组的温升变化趋势基本保持一致。绕组的热量通过绝缘向外面传递,绕组温升略高于绝缘温升。本文研究的 6 MW 永磁同步发电机的绕组绝缘等级为 H 级绝缘, F 级考核,电机运行时绝缘温升值远远低于电机设计的绝缘限值,所以电机可在此温度下持续工作。

图 7 和图 8 分别为定子铁心温升分布及定子齿沿轴向温升变化。1 号通风沟位于进风口侧,后面的通风沟编号依次增加。从定子铁心温升云图可以发现,整体而言定子铁心部分温升变化梯度相对较大,分布不是十分均匀,最高温升处于 6 号到 9 号径向通风沟附近,高达 99.28 K。在径向上,铁心温升随径向高度的增加呈下降趋势。在轴向上,铁心温升变化不大,这是由于热量主要沿径向传递,沿轴向传递的很少。

图 8 可知,铁心齿根处、距齿顶 3/4 处和齿顶处的温升分布曲线具有相同的变化趋势,均呈现出先增大再减小,随后增大到最大值再减小的趋势。随着径向长度的增加,齿根到齿顶处的温升逐渐减小,这是由于齿部与电机主要发热源绕组接触,主要发热点位于与下层绕组接触的齿根处,齿根处温升较高。而定

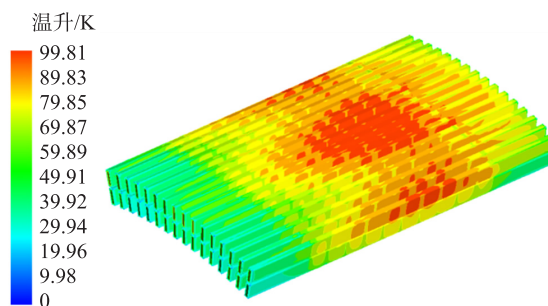


图 6 定子绝缘温升分布

Fig. 6 Temperature rise distribution of stator insulation

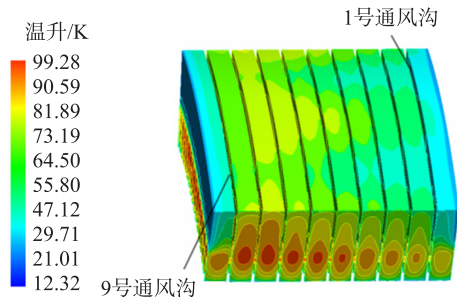


图 7 定子铁心温升

Fig. 7 Temperature rise of stator core

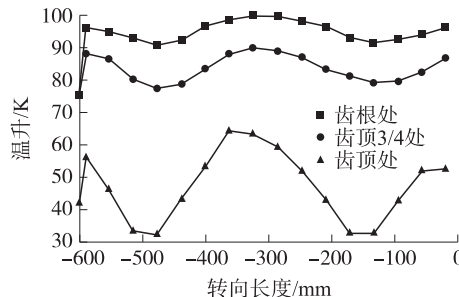


图 8 定子齿沿轴向温升变化

Fig. 8 Temperature rise change along the axis of stator tooth

子中产生的热量大部分向轭部传递,压板材质为钢材,热传递性好,可以高效带走与压板充分接触的定子轭部的热量,故定子轭部温升较小。

3.3 转子部分温升分析

图 9 为转子铁心的温升分布。由图 9 可知:(1)转子铁心整体上的温度分布不太均匀,温升最大值位于铁心中心处,为 96.18 K。随着轴向长度的增加,转子铁心的温升呈现出先增大再减小的趋势。(2)转子铁心两端区域温升较低,这是由于铁心两端能与冷却介质充分接触,空气能够很好地带走转子两端的热量。

分析永磁体的温升分布是研究永磁电机的重要部分^[25]。为具体分析永磁体的温升沿轴向分布规律,沿周向等距离取 4 个观测点并从上到下依次编号 A、B、C、D,得到永磁体沿轴向的温升变化曲线,如图 10 所示。

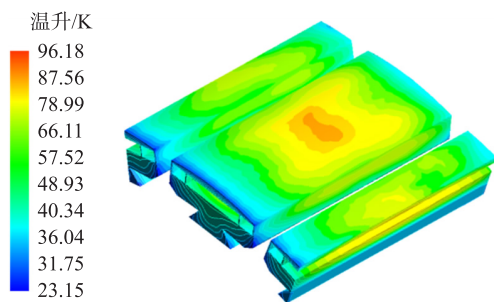


图 9 转子铁心温升

Fig. 9 Temperature rise of rotor core

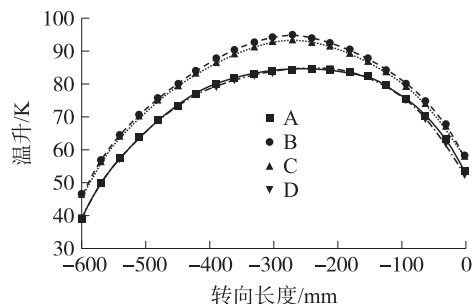


图 10 永磁体沿轴向温升分布

Fig. 10 Axial temperature rise of permanent magnet

通过图 10 可分析出,永磁体整体温升梯度较大,最高温升处于轴中心区域,为 96.18 K。进风端的温升低于电机背部的温升,这是由于冷却介质流过永磁体温升升高,冷却效果变差。随着轴向长度的增加温升逐渐上升达到最大值然后迅速下降,靠近转子气隙的温升最低,这是因为永磁体嵌入转子铁心与其紧密相连,在运行时热量不易传递,冷却性能不好,而转子气隙中冷却气体流动性好,因此散热效果与轴向其他位置相比更明显。

4 结语

本文以 6 MW 永磁同步发电机为研究对象,通过对其三维温度场进行数值计算与特性分析,得出如下结论:

(1) 定子股线温升最大,最大值为 100.36 K,定子上层绕组的温升要低于下层绕组,靠近进风侧的端部绕组温升低于支撑环一侧的端部绕组的温升。定子绝缘温升变化趋势与定子上、下层绕组温升变化趋势基本一致。

(2) 定子铁心齿部的温升高于轭部的温升,中间部分的温升高于两侧端部的温升,转子部分的温升略低于定子铁心温升,转子铁心与永磁体的最大温升分布位置基本相同,最大值为 96.18 K。

(3) 对数值仿真结果分析初步判断发电机满足绝缘要求,验证了本文中 PMSG 三维物理模型建立及数值计算方法的合理性。

[参考文献] (References)

- [1] 沈建新, 缪冬敏. 变速永磁同步发电机系统与控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 1-8.
SHEN J X, MIAO D M. Variable speed permanent magnet synchronous generator systems and control strategies[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2013, 28(3): 1-8. (in Chinese)
- [2] 占文涛, 何礼高. 基于双向 PWM 变换器的微燃机发电系统启动/发电控制研究[J]. 通信电源技术, 2009, 26(1): 20-23.
ZHAN W T, HE L G. Research on starter/generator control of micro-turbine generation system based on bidirectional PWM converter[J]. Telecom power technology, 2009, 26(1): 20-23. (in Chinese)
- [3] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2006, 21(1): 130-135.

- [4] 闫耀民,范瑜,汪至中. 永磁同步电机风力发电系统的自寻优控制[J]. 电工技术学报,2002,17(6):82-86.
YAN Y M, FAN Y, WANG Z Z. Self-optimization control of PM synchronous wind turbine generator system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2002, 17(6):82-86. (in Chinese)
- [5] SPOONER E, GORDON P, BUMBY J R, et al. Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbines[J]. IEEE proceedings electric power applications, 2005, 152(1):17-26.
- [6] 吴义勇,孙旭东,柴建云. 永磁磁阻发电机的电压控制[J]. 电工电能新技术,2006,25(4):63-66.
WU Y Y, SUN X D, CHAI J Y. Voltage control of permanent-magnet/re reluctance generator[J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2006, 25(4):63-66. (in Chinese)
- [7] 尹惠. 永磁同步电机损耗计算及温度场分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
YIN H. PMSM loss calculation and temperature field analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [8] 孙晓光,王凤翔,邢军强. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J]. 电工技术学报,2012,27(9):166-173.
SUN X G, WANG F X, XING J Q. Loss calculation and temperature field analysis of high speed permanent magnet motor[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2012, 27(9):166-173. (in Chinese)
- [9] 丁树业,郭保成,冯海军,等. 变频控制下永磁同步电机温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(9):1368-1375.
DING S Y, GUO B C, FENG H J, et al. Temperature field investigation of permanent magnet synchronous motors controlled by the frequency conversion control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9):1368-1375. (in Chinese)
- [10] 樊亚东,文习山. 水轮发电机定子三维温度场仿真计算[J]. 电站系统工程,2006,22(2):51-60.
FAN Y D, WEN X S. Simulation calculation of three-dimensional temperature field of hydro-generator stator[J]. Power system engineering, 2006, 22(2):51-60. (in Chinese)
- [11] 靳延船,李伟力,李守法. 感应电机定子温度场的数值计算[J]. 电机与控制学报,2006,10(5):492-497.
JIN T C, LI W L, LI S F. Numerical calculation and analysis of stator thermal field in an induction machine[J]. Electric machines and control, 2006, 10(5):492-497. (in Chinese)
- [12] 李立毅,张江鹏,闫海媛,等. 高功率密度电机三维温度场计算及导热优化研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3642-3650.
LI L Y, ZHANG J P, YAN H Y, et al. Study on the optimization of thermal conductivity and 3D temperature field calculation for the high power density motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13):3642-3650. (in Chinese)
- [13] 丁树业,孙兆琼,徐殿国,等. 3MW 双馈风力发电机传热特性数值研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(3):137-143.
DING S Y, SUN Z Q, XU D G, et al. Numerical investigation of heat transfer for 3MW doubly-fed wind generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3):137-143. (in Chinese)
- [14] 丁树业,葛云中,孙兆琼,等. 高海拔用风力发电机流体场与温度场的计算分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(24):74-79.
DING S Y, GE Y Z, SUN Z Q, et al. Calculation and analysis of field and temperature field for high-altitude type doubly-fed wind generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24):74-79. (in Chinese)
- [15] 张海凤,贾志超,赵海,等. 风力发电机三维温度场的数值模拟[J]. 电机与控制应用,2013,40(8):43-47.
ZHANG H F, JIA Z C, ZHAO H, et al. Numerical simulation of 3D temperature field for wind generator[J]. Electric machines and control application, 2013, 40(8):43-47. (in Chinese)
- [16] CANNISTRA G, LABINI M S, BLASI F. A Thermal transient finite-element study to connect suitable loads to an induction motor[C]//8th Mediterranean Electrotechnical Conference. Bari, Italy, 1996:294-295.
- [17] STATON D, BOGLIDO A, CAVAGNIO A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2005, 20(3):620-628.
- [18] DAESUK J, JUHEE C, KYUNGIL W, et al. Electromagnetic field and thermal linked analysis of interior permanent-magnet synchronous motor for agricultural electric vehicle[J]. IEEE transactions on magnetics, 2011, 47(10):4242-4245.
- [19] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004:1-123.
WANG F J. Computational fluid dynamics analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:1-123. (in Chinese)
- [20] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.
TAO W Q. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [21] DING S Y, LI H L. Investigation of characteristics of fluid flow pattern for air-cooled motor[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications. Hefei, China, 2016:2044-2048.

- [22] 丁树业,孟繁东,葛云中. 核主泵屏蔽电机温度场研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(36):149-155.
DING S Y, MENG F D, GE Y Z. Temperature field investigation of canned primary pump motors in nuclear power stations[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(36):149-155.(in Chinese)
- [23] 李伟力,李守法,谢颖,等. 感应电动机定转子全域温度场数值计算及相关因素敏感性分析[J]. 中国电机工程学报,2007,27(24):85-91.
LI W L, LI S F, XIE Y, et al. Stator-rotor coupled thermal field numerical calculation of induction motors and correlated factors sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(24):85-91.(in Chinese)
- [24] 王勇. 永磁同步电动机内流变特性及传热研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2015.
WANG Y. The research of characteristics for fluid flow and heat transfer for permanent magnet synchronous motor[D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology,2015.(in Chinese)
- [25] 李伟力,陈婷婷,曲凤波,等. 高压永磁同步电动机实心转子三维温度场分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(18):55-60.
LI W L, CHEN T T, QU F B, et al. Analysis on solid rotor 3-D temperature field in high voltage PMSM[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(18):55-60.(in Chinese)

[责任编辑:陈 庆]