

永磁式同步电机热分析研究综述

刘文娟¹, 潘超², 米俭²

(1. 辽宁省电力有限公司 运维检修部, 辽宁 沈阳 110006; 2. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 对永磁同步电机的损耗和温度场进行研究综述。介绍了永磁同步电机不同部位散热的分析和测定方法,并详细说明了关键参数量测的实验方法。最后给出计算关键参数的方法,从而构造更精确的集总参数热网络模型。

关 键 词: 磁损耗;计算流体动力学;有限元分析;永磁式同步电机

中图分类号: TM47

文献标识码: A

有新型永磁材料的永磁同步电机(PMSM)由NdFeB(Neodymium, Iron, Boron)和SmCo(Samarium, Cobalt)的稀土材料组成,具有高效率、高功率因数和高功率密度等优点。然而,由于稀土价格的增加以及80%的稀土材料分布在中国,设计者们已开始探寻新的拓扑结构,以减少稀土永磁材料在设计中的用量。设计人员着手研发同步磁阻电机(SynRM);其拓扑结构中的转子结构没有永磁部分,因此具有成本低的优点。另一方面,同步磁阻电机与永磁同步电机相比,具有较低的功率密度、效率和功率因数。设计者们早已注意到,如果在同步磁阻电机的转子结构内部加入一些永磁材料,会对电机的效率、凸极比和功率因数产生巨大的影响。这种新的拓扑结构被称为永磁辅助式同步磁阻电机(PMASynRM),并具有数个自己的优点,例如高凸极比、高功率因数、高效率以及对低成本的铁氧体铁磁材料的利用。这个拓扑结构结合了同步磁阻和内部永磁电机拓扑结构,在电动车牵引应用中备受欢迎^[1-2]。

永磁材料的应用和热应力下的不可退磁性,使得对永磁辅助式同步磁阻电机热场设计的研究变得十分重要。热应力由电机的损耗产生,以永磁体材料中的热能和温升的形式存在。高温下的永磁材料保护方法分为两种:第一种是考虑如何通过对电机不同部位的电磁设计进行优化来减少损耗;第二种是关于电机的热分析,通过选择合适的冷凝系统来散发电机中的损耗^[3]。

现如今由于客户对高效率、小型化、紧凑型电机的需求日益上升,对设计者来说电机的温度场设计变得更具有挑战性。过去的电机温度场设计看起来并不重要并且易于实现,这些结论是通过比较一定数量的电机电磁设计与温度场设计文献得出的。其原因显而易见,电机设计者是电气工程专业,而温度场设计领域与机械工程有关。电机的热分析比电磁设计更为复杂。一个电机的热场模型与制造过程直接相关;与电磁设计相比,电机的热分析始终是一个三维问题。在某些热力学现象中,电机的热现象不能用纯粹的数学关系来描述^[3-4]。

本文的主要目的是介绍永磁辅助式同步磁阻电机中的损耗,基于解析集总参数法和其它电机热场研究的经验来计算分析电机关键部位的热损耗。

收稿日期:2016-11-23

作者简介:刘文娟(1964-),女,高级工程师,主要研究方向:电力系统分析与控制。

电子邮箱:13909839721@163.com(刘文娟);31563018@qq.com(潘超);1911152213@qq.com(米俭)

1 损 耗

永磁辅助式同步磁阻电机中的损耗主要分为三类:定子铜损、铁芯损耗和磁损耗^[3]。

1.1 铜耗

永磁辅助式同步磁阻电机中的最高损耗是定子铜耗,定子铜耗由交流部分和直流部分两部分组成。直流部分的损耗包括温度对绕组电阻增大的影响,交流部分的损耗包括趋肤效应和邻近效应。高速电机以及有变频器的绕组式电机中直流部分的损耗更为显著。减少交流中铜耗量有两种方法:使用绞线或分裂子导线^[3,5-6]。根据文献[6], m 相绕组中总的铜损耗量可以通过以下公式计算:

$$P_{cu} = mI^2 R, \quad (1)$$

其中: R 为相绕组的电阻,它可以通过以下公式计算:

$$R = K_R \frac{NI_{av}}{\sigma S_c}, \quad (2)$$

其中: K_R 为趋肤效应系数, N 为匝数, I_{av} 表示一匝的平均长度, S_c 表示铜线的横截面积, σ 表示铜的电导率。公式(2)通过系数 K_R 把直流损耗和交流损耗结合在一起,计算式未区分趋肤效应和邻近效应。

1.2 铁耗

迄今为止许多研究课题都在处理铁耗这一复杂的问题。最常见的原则有两项法和三项法,此类方法都基于斯坦梅茨^[7]和贝尔托蒂的早期工作^[8]。两项法把铁芯损耗分为两类,即磁滞损耗(静态损耗)和涡流损耗(动态损耗),并通过以下公式计算得到:

$$P_{Fe} = P_h + P_e = K_h B^n f + K_e B^2 f^2, \quad (3)$$

其中: K_h 和 K_e 分别是磁滞和涡流损耗系数, B 是正弦交变磁通密度的峰值(单位为特斯拉)。 n 依据材料在1.5和2.5之间取值, f 是频率(单位为赫兹)。在贝尔托蒂的方法中, n 设置为1并在公式(3)中添加一个附加损耗项,这个附加损耗由以下公式计算:

$$K_{exc} B^{1.5} f^{1.5}. \quad (4)$$

1.3 磁损耗

磁损耗是磁体中由于线槽旋转、电源或其它几何效应产生的高次谐波磁通所感应的磁场涡流引起的。磁损耗可由以下公式近似得到:

$$P_m \approx \frac{V_m b_m^2 B_m^2 f^2}{12\rho_m}, \quad (5)$$

其中: f 为频率(赫兹); ρ_m 为磁电阻率; V_m 为磁体总体积; B_m 为气隙磁通密度; b_m 为磁体宽度。

铁氧体磁性材料的磁损耗可以忽略的原因是由于其高的电阻率,然而NdFeB和SmCo这样高能量永磁体中,由于其低电阻率使得铁耗变得非常显著^[3,9]。

2 热场分析方法

电机的热分析方法主要分为两类,即解析集总电路法和数值热分析法^[4]。

2.1 基于集总参数的热分析

集总参数热网络(LPTN)分析法用于计算来自电机不同部位的热传递与热流动,这种解析方法的优点是计算速度快。因此用这种方法计算热场电路中不同部位的温度用时短。在计算过程中确定传热路径的准确性起着重要的作用,温度几乎相同的组件集中在一起用一个节点表示,主要的热传递方式是通过节点间的热阻抗表示的。例如热量通过一些传导电阻从线圈流到槽齿处,再到铁芯和机体框架,最

后借助于对流和辐射电阻从框架转移到电机外部环境。在绘制了所有主要的热量传递路径后,构建的热场模型看起来像是由热电阻和电源组成的网络。热场等效环路类似于一个电路系统,其温度就像电压,功率损耗就像电流源,热阻就像电阻^[4]。每当需要获取热场信息时,就通过迭代求解网络矩阵的方法计算得到节点温度。

$$[T] = [G]^{-1}[P], \quad (6)$$

其中:[T]为温度矩阵;[G]为热传导矩阵;[P]为损耗矩阵。

早期关于集总参数热网络应用的文献是由梅勒在1991年撰写的^[10]。依据文献[10],这种模型的应用太过复杂以至于无法在轴向和径向方向上显示热传递效果。因此,应用复杂的数学关系式来解决不同的热力学现象。此后的博列蒂于2003年通过对热流路径的简化和假设提出了一种简易模型。例如,假设电机仅在径向方向散热且各部件的功率损耗分布均匀。对比博列蒂和梅勒的建模工作,他们移除了网络中大部分轴向元件,最终两人的结果非常相似^[11]。

2.2 数值热分析

数值分析分为两类:有限元分析(FEA)和计算流体力学(CFD)^[4,12]。

有限元分析法是二维和三维模型中电磁设计与计算的常用方法。考虑到温度场设计的重要性才将其加入到有限元分析软件中,该方法在计算电机内部热传导方面非常精确。为了计算接触、对流和辐射电阻,也需要用到集总参数热网络中的经验公式和计算流程。有限元法不同于集总参数热网络,它可以精确地计算电机内部功率损耗的不均匀分布情况。这种方法非常耗时,需要花费大量的时间来构造模型,因此它被用于一个无法用集总参数热网络计算的复杂模型^[4]。

计算流体力学方法是一种复合方法。它除了计算传热外,还具有流体流动预测的能力。因此,设计者应具备流体和传热的知识。在实际中,当经验公式和一般公式不能用于传热预测时就会用到该方法,例如端部绕组和端盖区域的热场分析。这种方法也用来计算对流换热系数^[13]。

3 散 热

电机散热有三种形式:传导、对流和辐射^[6]。

3.1 传导

传导散热有两种不同的机理:第一种是对分子相互作用与分子振动进行定义;第二种是依据材料中的自由电子定义^[6]。

传导电阻由以下公式计算:

$$R_{th} = \frac{l}{kA}, \quad (7)$$

其中: l 为路径长度(m); k 为导热系数[W/m℃]; A 为传热面积(m²)。

依据公式(7),传导电阻主要取决于材料的导热系数和材料的尺寸,当导电材料有很高的导热系数或者传热面积与路径长度的比值较大时,传导电阻降低^[5]。

传导电阻计算中有两个关键区域:一个区域与定子槽相关,另一个区域与不同材料间的界面或接触电阻有关^[3,6,14]。

线槽区域的铜导体、导体绝缘(导体搪瓷)、槽绝缘和浸渍材料都有不同的导热系数。通常导电材料也是良好的热导体,但是绝缘和浸渍材料的电导率较低。因此这些材料不能有效地将热能传递到齿槽处。设计者们采用等效导热系数的方法来克服这样的建模问题。集总参数热网络中对线槽等效导热系数的计算有不同的解析方法,比如立体绕组模型、分层绕组模型和等效绝缘法^[15]。

等效导热系数由Hashin-Shtrikman表达式来估算^[16]。当线槽至少由三部分组成时,Hashin-Shtrik-

man 相关公式可用于其中两种材料的计算。为了解决该问题可以采用两种不同的简化假设。本文假设导体绝缘与浸渍材料有相同的导热系数,这种情况下的等效导热系数由以下公式确定:

$$K_e = K_2 \frac{(1 + f_1)K_1 + (1 - f_1)K_2}{(1 - f_1)K_1 + (1 + f_2)K_2}, \quad (8)$$

其中: K_1 为导体的导热系数; K_2 为槽浸渍材料的导热系数; f_1 为槽内导体的体积比; f_2 为定子槽内浸渍材料的体积比。因此, $f_1 + f_2 = 1$ ^[3,16]。

通过实测对定子绕组等效导热系数进行试验测定和评估的方法有两种:热稳态试验和短时热暂态试验^[11,15],这两种实验方法适用于有分布式绕组的电机^[15]。

在稳态测试中,三相分布的定子绕组与直流电源串联或并联连接。此时,永磁辅助式同步磁阻电机的损耗是定子铜耗。考虑到热安全原因,转子转速为零时的直流电流限制为额定电流的 50% ~ 70%。这种测试需要较长时间,一般电机需要几个小时才能达到热稳态。

短时热暂态测试由博列蒂提出,文献[17]中描述了测试的全部过程。不同于稳态测试,短时热暂态测试中的三相定子绕组接有一个电流等效为额定电流的直流电源。该方法假设定子叠片处于恒温状态,当定子叠片温度增加 1 度时测试结束,这样可以使测试周期减少到几分钟。

传导电阻测定中第二个关键问题是确定两个材料之间的接触或界面间隙。电机热分析中有不同类型的接触电阻,例如:框架到定子轭、槽绝缘衬到叠片及永磁体到转子叠片的接触电阻。材料表面的柔软度和平滑度、气压及元件的不规则性导致了界面间隙的产生。最重要的接触电阻与框架到定子叠片之间的界面间隙有关。大部分的热量通过该区域,因此对该区域接触电阻的精确计算才会使温度测定准确^[12,14]。界面间隙电阻由以下公式计算:

$$R_g = \frac{I_g}{2K_{air}\pi r_{oy}L_s}, \quad (9)$$

其中: I_g 为界面间隙; K_{air} 为空气的导热系数; r_{oy} 为定子轭外半径; L_s 为定子铁芯长度。

公式(9)中关键的部分是对界面间隙长度的估算。林德斯特伦在文献[18]中介绍了一种基于框架材料和电机功率范围的列表方法。博列蒂在文献[12]中试图寻找一个可以确定界面间隙的经验公式,但是最后没有任何公式可以描述界面间隙的状态。他观发现即便是同一家公司生产的同一种电机其界面间隙长度是不尽相同。因此最终得出的结论是界面间隙不仅取决于框架材料,而且取决于制造工艺和材料表面的状态。最后他建议使用一个平均的界面间隙作为初步估算。

3.2 对流

对流是最显著的传热方法,它因冷却流体运动而产生。对流的类型分为两种:自然对流和强制对流。当物体放置到不同温度的流体中时会发生自然对流,其物理定义是浮力;强制对流中的流体运动是由风扇、泵或风机这样的外力造成的^[6,19]。

对流热电阻由以下公式计算得到:

$$R_{th} = \frac{1}{hA}, \quad (10)$$

其中: h 为对流换热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2, ^\circ\text{C})]$; A 为对流表面积 (m^2) 。

对流换热系数的定义是对流热阻计算中最重要的部分。而电机不同部位形状的简单性如平板、线圈和气缸等,使许多经验公式可以用于对流换热系数的计算。为了同时计算自然对流和强迫对流系数,经验公式由无量纲数定义。自然对流公式为

$$Nu = a(Gr \cdot Pr)^b, \quad (11)$$

强制对流公式为

$$Nu = a(Re)^b(Pr)^c, \quad (12)$$

其中: Nu 为努塞尔数; Gr 为格拉晓夫数; Pr 为普朗特数; Re 为雷诺数; a, b 和 c 为常数。

Gr, Pr , 和 Re 可由以下公式计算:

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2}, \quad (13)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}, \quad (14)$$

$$Re = \frac{\rho g L}{\mu}, \quad (15)$$

其中: μ 表示流体粘度 [$\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m})$], ρ 表示流体密度 (kg/m^3), C_p 表示流体比热容 [$\text{kJ}/(\text{kg}, ^\circ\text{C})$], v 表示流体速度 (m/s), ΔT 表示流体与冷却表面的温差 ($^\circ\text{C}$), L 表示表面特征长度 (m), β 表示流体的体积膨胀系数 ($1/\text{K}$), g 表示重力加速度 (m/s^2)^[14, 19, 20]。

对流换热系数和努塞尔数之间的关系式为^[14, 19]:

$$h = \frac{Nuk}{L}, \quad (16)$$

自然对流中 Gr, Pr 的量级用来确定流体是层流还是湍流,而在强制对流中 Re 的量级则做此用。

对流电阻的计算中存在三个关键区域:第一个是电机外表面的散热片,第二个与电机的末端空间有关,最后一个与气隙的传热有关。

电机光滑表面传热系数的计算比较简单,但是轴向和径向散热片表面的传热系数需要更复杂的公式来计算,因此,该区域需要基于组合公式进行计算。该方法中,任何一个复杂散热片几何形状的计算都基于水平板、垂直板、气缸和其他几何形状的组合^[14]。

电机的末端空间很难确定其对流系数。末端空间包括端部绕组、端盖和某些机体中简单的风扇。一些作者如梅勒、鲍尔和舒伯特曾做过关于端部绕组冷却的研究。计算末端空间热对流系数最有用的公式是:

$$h = k_1 (1 + k_2 V^{k_3}), \quad (17)$$

其中: k_1, k_2 和 k_3 为曲线拟合系数; V 为流体速度 (m/s)。上式的第一项代表自然对流,第二项代表强制对流^[14]。

最后一个关键部分与空气间隙的对流系数计算有关。第一个计算公式由泰勒在 1935 年提出,然后由盖兹利在 1958 年进一步完善。计算公式为

$$Ta = \frac{\rho^2 \Omega^2 r_m \delta^3}{\mu^2}, \quad (18)$$

其中: Ta 为泰勒数; Ω 为转子角速度; r_m 为转子和定子的平均半径; δ 为径向气隙长度^[6, 14]。

利用 Becker 和 Kaya 公式, $Ta \leq 1700$ 的努塞尔数为 2, $1700 < Ta \leq 10^4$ 的努塞尔数由以下公式计算:

$$Nu = 0.128 Ta^{0.367}, \quad (19)$$

$10^7 > Ta > 10^4$ 的努塞尔数有以下公式计算^[6]:

$$Nu = 0.409 Ta^{0.241}, \quad (20)$$

3.3 辐射

辐射是一种不需要介质传热的热传递现象,此现象通过电磁波传热。辐射电阻的计算式为:

$$R = \frac{1}{h_r A}, \quad (21)$$

其中: h_r 为辐射系数; A 为辐射表面积^[4, 6]。

辐射直接取决于辐射率和辐射角系数,两个系数在 0 - 1 的范围内变化。辐射系数有以下公式

计算:

$$h_r = \sigma \varepsilon F_{1-2} \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)}, \quad (22)$$

其中: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$; 大多数电机的表面辐射率 $\varepsilon = 0.85$; F_{1-2} 为散热面到吸收面的辐射角系数; T_1 和 T_2 分别为表面 1 和表面 2 的温度(K); 辐射角系数依据表面形状算得。有很多文献介绍了其算法, 例如文献[19] 和文献[20]。

辐射发生在电机的内部和外部, 使得辐射角系数的计算难度较大。例如, 计算端部绕组和绕组的辐射角系数是相当困难的。关于辐射的另外一个难题是辐射与对流同时发生, 通过测量区分这两种现象是十分困难的。实际中采用真空室实验设备来测量辐射系数, 这种设备在普通实验室中并不常见。当辐射与自然对流同时存在时辐射变得更加显著, 但在强迫对流的情况下辐射可以忽略, 此时辐射电阻远远大于强制对流电阻^[10,21]。

4 总 结

本文对永磁辅助式同步磁阻电机的热分析研究进行综述, 并介绍了永磁辅助式同步磁阻电机中的重要损耗。本文对比了解析法和数值法两种不同类型的热分析法, 并考虑了每种方法的优缺点。本文深入分析了集总参数热网络法, 叙述了不同热传递现象的经验公式, 对电机中关键的热分析参数做出说明。针对各关键参数提出不同的各种解决方案和经验公式。最后, 阐述了获取每个关键参数的试验方法。

参 考 文 献

- [1] 王子安. 电动汽车用铁氧体永磁同步电机的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [2] P. Lazari, J. Wang, B. Sen. 3-D effects of rotor step-skews in permanent magnet assisted synchronous reluctance machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [3] M. Popescu, D. Staton, D. Dorrell, et al. Study of the thermal aspects in brushless permanent magnet machines performance[C]. Electrical Machines Design Control and Diagnosis. IEEE, 2013: 60-69.
- [4] 徐云龙. 高速永磁电机损耗计算与热分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [5] 梁培鑫. 永磁同步轮毂电机发热及散热问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] J. Pyrhönen, T. Jokinen, V. Hrabovcova. Design of Rotating Electrical Machines[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [7] C. Steinmetz. On the law of hysteresis[J]. AIEE Transactions, 1892, 9(3): 3-64.
- [8] G. Bertotti. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. Magnetics IEEE Transactions on, 1988, 24(1): 621-630.
- [9] Y. Burkhardt, G. Huth, S. Urschel. Eddy current losses in PM canned motors[C]. Xix International Conference on Electrical Machines. IEEE, 2010: 1-7.
- [10] P. Mellor, D. Roberts, D. R. Turner. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design[J]. IEE Proceedings B-Electric Power Applications 1991, 138(5): 205-218.
- [11] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, et al. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 945-952.
- [12] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton. Determination of critical parameters in electrical machine thermal models[J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2008, 44(4): 1150-1159.
- [13] J. Duboue, N. Liams, L. Pate. Recent advances in aerothermal turbine design and analysis[C]. Joint Propulsion Conference and Exhibit. 2013: 233-258.
- [14] D. Staton, A. Boglietti, A. Cavagnino. 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.
- [15] A. Boglietti, E. Carpaneto, M. Cossale, et al. Stator-Winding Thermal Models for Short-Time Thermal Transients: Definition and Validation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2713-2721.

- [16] N. Simpson, R. Wrobel, P. H. Mellor. Estimation of equivalent thermal parameters of impregnated electrical windings [J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2013, 49(6): 2505–2515.
- [17] A. Boglietti, E. Carpaneto, M. Cossale, et al. Electrical machine first order short-time thermal transients model: measurements and parameters evaluation [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2014, Conference of the IEEE. IEEE, 2015: 555–561.
- [18] J. Lindstrom. Thermal Model of a Permanent-Magnet Motor for a Hybrid Electric Vehicle. Licentiate thesis [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 1999.
- [19] A. Cavagnino, D. Staton. Convection heat transfer and flow calculations suitable for analytical modelling of electric machines [C]. IEEE Industrial Electronics, IECON 2006, Conference on. IEEE, 2006: 4841–4846.
- [20] J. P. Holman, Heat Transfer [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1997.
- [21] S. N. Rea, S. E. West. Thermal radiation from finned heat sinks [J]. IEEE Transactions on Parts Hybrids & Packaging, 1976, 12(2): 115–117.
- [22] M. F. Modest. Radiative Heat Transfer [M]. New York: Academic, 2003.
- [23] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Parvis, et al. Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3): 688–693.
- [24] 潘超, 王梦纯, 杨德友, 等. 变压器三维电磁场有限元计算问题的研究 [J]. 东北电力大学学报, 2014, 34(2): 21–26.

Loss and Thermal Study Review of Permanent Magnet Synchronous Machines

Liu Wenjuan¹, Pan Chao², Mi Jian²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang Liaoning 110006; 2. Electrical Engineering College, Northeast Electric University, Jilin Jilin 132012)

Abstract: A literature review of the losses analysis and thermal study of permanent magnet synchronous motors. The analysis and measurement for different components of heat extractions and are introduced. And the experimental methods for the key parameters are provided in details. Finally, advices are given about parameter computation, as to construct more accurate model of lumped-parameter thermal network.

Key words: Magnet losses; Computational fluid dynamic; Finite element analysis; Permanent magnet synchronous machines.