

半直驱永磁风力发电机电磁损耗分离计算研究

邹应冬¹,王峰军¹,周羽²

(1. 东方电气集团东方电机有限公司, 四川 德阳 618000;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:以半直驱永磁风力发电机电磁损耗分离计算为研究内容,首先在 Bertotti 铁耗计算方法的基础上推导考虑谐波电流的电机铁心损耗计算方法,根据永磁体涡流密度的轴向分量和切向分量得到永磁体的涡流损耗,分析定子绕组的直流铜耗、交流铜耗和环流损耗解析计算方法;其次,根据有限元磁场计算结果,分析 6.5 MW 半直驱永磁风力发电机内各部位的磁密随时间变化情况,铁心中磁密的空间和时间谐波均较丰富,同时计算并分析电磁频率对电机铁心损耗的影响情况;然后,研究 6.5 MW 半直驱永磁风力发电机的永磁体涡流损耗与电磁频率之间的关系,永磁体涡流损耗随电频率增加而增大;最后,利用有限元法与理论计算法相结合的方式定量计算 6.5 MW 半直驱永磁风力发电机的绕组直流电阻损耗、交流损耗和环流损耗,绕组交流损耗和环流损耗较大。研究成果可用于半直驱永磁风力发电机电磁损耗分离计算,为高性能低成本半直驱永磁风力发电机研发提供支撑。

关键词:半直驱;永磁风力发电机;电磁损耗

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26417

Research on Electromagnetic Loss Separation Calculation of Semi-direct Driven Permanent Magnet Wind Generator

ZOU Yingdong¹, WANG Fengjun¹, ZHOU Yu²

(1. Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: This research focused on the separation and calculation of electromagnetic losses in semi-direct driven permanent magnet wind generators (SDDPMWG). Firstly, analytical method for calculating core loss of motor considering harmonic current was derived based on the Bertotti method. The eddy current loss of permanent magnet was obtained by analyzing axial and tangential components of the eddy current density of permanent magnet. The analytical methods for calculating DC copper loss, AC copper loss, and circulating current loss of the stator winding were also analyzed. Secondly, the changes of flux density over time in 6.5 MW SDDPMWG were analyzed according to finite element method. The spatial and temporal harmonics of flux density in the core were abundant. The impact of electromagnetic frequency on core loss of generator was calculated and analyzed. Then the relationship between eddy current loss of permanent magnet and electromagnetic frequency in 6.5 MW SDDPMWG was studied. Eddy current loss of permanent magnet increases with the increase of electrical frequency. Finally, finite element method and theoretical method were combined to calculate winding DC loss, AC loss and circulating current loss of 6.5 MW SDDPMWG quantitatively. The winding AC loss and circulating current loss are big. The research results can be effectively used for electromagnetic loss separation calculation of SDDPMWG. It can also provide support for the development of high-performance and low-cost SDDPMWG.

Key words: semi-direct driven; permanent magnet wind generator; electromagnetic losses

随着化石能源的逐渐枯竭、全球变暖趋势的不断加剧以及环境污染的日趋严重,人们对可再

生能源与低碳清洁能源的需求越来越旺盛^[1]。由于风能储量大、分布广,且具备可再生性与清洁

基金项目:四川省科技计划项目(2022YFG0305)

作者简介:邹应冬(1986—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为大中型发电机设计,Email:dfemzyd@126.com

通讯作者:周羽(1983—),男,博士,副研究员,主要研究方向为永磁电机设计及其控制,Email:zhouyu_engineer@hotmail.com

性,风力发电是一种前景广阔的新能源发电方式。当前,我国风电装机容量已达5.3亿kW,占全球风电总装机的50%。2024年风电新增并网装机容量约为8800万kW,风力发电量占全国总发电量的1/10左右。永磁风力发电机是风电装备中的重要组成部分,半直驱永磁风力发电机综合了直驱永磁发电机和双馈发电机的优势,它既在双馈机型的基础上降低了齿轮箱的传动比,又在直驱传动机型的基础上提升了转速与结构紧凑程度,提高了齿轮箱的可靠性和使用寿命。一方面降低了发电机的体积和制造成本,进而使得机舱整体重量减轻,成本大大降低;另一方面,对增速机构的要求大大降低,使得故障率最高的齿轮箱可靠性更高,稳定性更强^[2]。但研发人员在半直驱永磁风力发电机的研究和制造过程中,存在损耗分项分离计算不够准确、理论计算方法掌握不足和损耗分析方法掌握不全等问题,这样会导致计算值与实验值出现较大偏差,温升偏高,电机性能没法满足要求。在永磁电机运行过程中,其电磁损耗一般分为:定子铁耗和铜耗;转子涡流损耗和铁耗。

Bertotti 基于附加损耗的发现对两项式铁耗计算模型进行了改进,提出了包含附加损耗项的经典三项式铁耗计算模型^[3]。为了解决 Bertotti 三项式铁耗计算模型适用性的问题,研究人员开始探索磁通密度和频率与损耗系数的关系。Dan Mionel 等人研究发现,损耗系数可以表示为频率和磁通密度的函数,据此提出了两项式和三项式变系数铁耗计算模型,通过三种不同型号的硅钢片验证了变系数模型的计算精度^[4-5]。在研究过程中,学者们发现:当磁通密度或频率较高时,涡流损耗明显增加。文献[6]对这种现象进行了深入研究,通过在涡流损耗项中增加一个附加磁通密度高次项的方式对模型进行改进。

永磁电机转子磁钢损耗主要是永磁体涡流损耗,永磁电机转子永磁体涡流损耗的计算方法主要分为两种类型,商用有限元软件仿真和解析计算的方法。有限元仿真转子永磁体涡流损耗可考虑多种复杂结构下的损耗变化,包括电机永磁体分段对损耗的、不同磁极结构的影响、考虑电机饱和对损耗的影响,并能直观得到电机在任意时刻的磁通密度和损耗分布^[7]。文献[8]建立转子涡流损耗解析模型。考虑谐波电流、定子开槽、转子不同旋转状态、永磁体和护套中涡流反

应场5个子域。文献[9]提出一种气隙磁导谐波引起的永磁体涡流损耗的简化解析计算模型,此方法计算耗时短,并采用此方法优化样机使永磁体涡流损耗降低了90.2%,抑制效果明显。文献[10]针对齿槽效应引起的转子涡流损耗,建立解析计算模型,该模型考虑了5个子域及涡流反应,解析计算得出转子各部分涡流损耗。

大功率永磁风力发电机中常采用多股并绕的实心矩形导线或空心矩形导线,由于扁铜线的截面相对圆铜线要大的多,扁线绕组受到集肤效应和邻近效应的影响更大,会使绕组交流损耗增加,影响电机运行效率。铜耗包括直流铜耗、导体内涡流损耗、股线间环流损耗等^[11]。解析法和数值法是常用的计算绕组交流损耗的方法。浙江大学的周登通过多截面场路耦合法和解析法分别对4种定子换位绕组进行环流损耗计算,通过结果对比验证了多截面场路耦合法的优点^[12]。Dmitry Golovanov 提出了一种快速的绕组铜损耗建模分析方法,该方法将子域方法与绕组等效电路的常微分方程组的求解相结合,在电机设计阶段可以节省大量时间^[13]。Jiang Yapeng 介绍了一种计算成型绕线绕组交流铜损耗的半解析方法,该方法可以同时模拟股线的集肤效应、临近效应和股线间的环流效应。该解析法计算速度快,但计算误差大,常用于初始设计阶段的绕组铜损估算^[14]。

本文研究了半直驱永磁风力发电机电磁损耗分离计算方法并分析了计算结果。基于电机铁心损耗计算的经典 Bertotti 三项系数模型,得到考虑谐波电流和饱和因素的电机铁耗计算模型。在现有永磁电机解析模型的基础上,通过结合三维解析模型,得到任一时刻电机的转子永磁体涡流损耗。把绕组损耗分为绕组直流铜耗、交流铜耗和环流铜耗三部分进行分项理论分析。以6.5 MW 半直驱永磁风力发电机为研究对象,定量计算铁心损耗、永磁体涡流损耗和绕组损耗,并进行详细分析。

1 永磁电机电磁损耗理论分析

1.1 考虑谐波电流的电机铁心损耗

谐波分析法主要应用在变频电机的铁耗建模中,将电机非正弦供电时的性能求解分解为一系列不同频率的正弦信号激励源,然后再根据相对应频率下铁磁材料特性进行分析计算。风力

发电机通常接入PWM整流桥的变流器,因此考虑谐波电流对电机损耗影响非常有必要。

在高频和高磁密时,经典的Bertotti三项常系数模型计算的涡流损耗值将会比真实值偏小,该低估值可通过在涡流损耗项中添加磁密高次项补偿^[3]:

$$P_{Fe} = k_h B^a f + k_c B^2 f^2 (1 + k_1 B^{k_2}) + k_e B^{1.5} f^{1.5} \quad (1)$$

式中: $k_h B^a f$ 为磁滞损耗; k_h 为磁滞损耗系数; B 为磁密; f 为频率; $k_c B^2 f^2 (1 + k_1 B^{k_2})$ 为涡流损耗; k_c 为涡流损耗系数; $k_1 B^{k_2}$ 用来计及由饱和因素引起的涡流损耗增加值; k_1, k_2 分别为系数和指数; $k_e B^{1.5} f^{1.5}$ 为附加损耗; k_e 为附加损耗系数。

但式(1)中各损耗系数均为常数,且并未考虑由谐波磁场引起的磁滞损耗的变化情况,故无法在频率和磁密范围跨度较大时,保证模型的准确性。

在式(1)基础上考虑了由谐波磁场引起的铁心损耗,得到新的计算模型^[5]:

$$P_{Fe} = k_h \sum_{n=0} (B_n^a f_n) + k_c \sum_{n=0} (B_n^2 f_n^2) + k_e k_1 B^{k_2+2} f^2 + k_e \sum_{n=0} (B_n^{1.5} f_n^{1.5}) \quad (2)$$

式中: B_n, f_n 为铁心磁密傅里叶分解得到的磁密和频率。

其中, $k_e k_1 B^{k_2+2} f^2$ 是由饱和因素所引起的涡流损耗增加值,式(2)计及了谐波磁场对磁滞损耗的影响。

电机中典型的磁密在变化的过程中,存在着局部磁密出现非线性转折的现象,即磁密反向变化,这种现象称为小磁滞回环。它会导致磁滞损耗的增加,可用磁滞损耗修正系数 k_B 进行表示^[6]:

$$k_B = 1 + k_m \sum_{\xi=1}^n \left(\frac{\Delta B_{m\xi}}{B_m} \right) \quad (3)$$

式中: k_m 为常数,一般取0.65; n 为一个电周期内局部磁密变化次数; $\Delta B_{m\xi}$ 为局部磁密变化量。

考虑小磁滞回环对永磁风力发电机铁心损耗计算的影响时,其计算模型可表示为

$$P_{Fe} = k_B k_h \sum_{n=0} (B_n^a f_n) + k_c \sum_{n=0} (B_n^2 f_n^2) + k_e k_1 B^{k_2+2} f^2 + k_e \sum_{n=0} (B_n^{1.5} f_n^{1.5}) \quad (4)$$

PWM控制下,由于电流的高频波动,将导致电枢反应磁场高频波动,小磁滞回环也会出现,式(4)对PWM变流器情况下的永磁风力发电机

铁耗计算有较大修正作用。

1.2 永磁体涡流损耗

对永磁体涡流损耗的分析,数值上的准确计算固然重要,但是其分布规律也同样不容忽视。永磁体涡流损耗可由下式计算^[15]:

$$P_{eddy} = \int_V E \cdot J dV = \int_V \frac{J^2}{\sigma} dV = \int_V \rho J^2 dV \quad (5)$$

式中: E 为涡流电场强度; J 为涡流密度; σ 为永磁体的电导率; ρ 为永磁体的电阻率,本文假设其各向同性, $\rho=1/\sigma$; V 为永磁体的体积。

在现有永磁电机解析模型的基础上,通过结合三维解析模型,在永磁体分段后,计算在任一时刻电机的转子涡流损耗。根据涡流密度的轴向分量和切向分量可以得到永磁体的涡流损耗^[16]:

$$P_c(t) = \sum_v \sum_k \sum_m \sum_n \frac{n_z n_\theta n_r}{\sigma} \iiint [J_z^2(r, \theta, z, t) + J_\theta^2(r, \theta, z, t)] r d\theta dz dr \quad (6)$$

式中: v 为轴向磁场谐波次数; k 为第 k 个永磁体; m 为未开槽的磁场谐波次数; n 为磁场槽谐波次数; t 为时间; J_z 为轴向电密; J_θ 为切向电密; r, θ 和 z 分别为径向、切向和轴向变量。

1.3 永磁风力发电机绕组损耗理论分析

永磁风力发电机的定子端部绕组处于空气中,其对应的电阻近乎不受到交流磁场的显著影响,因此端部区域仅考虑计算其直流电阻产生的铜损耗;由于直线段绕组处于定子槽内,所处环境的磁场强度更高,因此槽内直线段绕组将综合考虑直流铜损耗、交流铜损耗和环流损耗。

1.3.1 端部绕组的直流铜损耗计算

定子端部绕组处于空气中,可近似认为该部分没有涡流附加铜耗,只有基本的直流铜损耗和环流损耗,其中,直流铜损耗可表示为

$$P_{end} = \sum_{e=1}^n I_e^2 R_{end} \quad (7)$$

式中: e 为电流谐波次数; I_e 为各次电流的有效值; R_{end} 为端部绕组总电阻。

1.3.2 槽内绕组的直流铜损耗

电机运行时,直流电阻发热造成能量损失,这部分损耗被称为直流铜耗,直流铜耗与电流频率无关,绕组直流铜损耗计算公式如下:

$$P_{dc} = m \sum_{e=1}^n I_e^2 R_{dc} \quad (8)$$

式中: m 为定子绕组的相数; R_{dc} 为槽内直线段的

相电阻。

1.3.3 槽内绕组的交流铜损耗

永磁风力发电机在额定工况下,定子绕组中通以工作电流产生槽磁通势及横穿槽宽方向的漏磁通,槽磁通势从槽底朝定子内圆逐渐增大,沿股线分布的漏磁通感应出股线截面上大小不等的电动势,因而在股线中产生涡流。涡流使得导线截面中电流分布不均,使导线边缘电流密度增加。由于定子绕组在下线前需进行绝缘包扎等处理,当大型永磁发电机的矩形槽内有两根导体时,其电流密度沿径向高度分布不均匀。多根矩形铜股线上通以交流电时,各股线上会存在集肤效应,紧挨的股线间也会产生临近效应,这两种效应导致股线上生成涡流,进而各股线上会产生涡流损耗。

由于涡流使得导体截面电流密度分布不均匀,导致绕组电阻增大。为计及这部分损耗,定义交流电阻与直流电阻的比值为定子绕组电阻增大系数,也称弗立特系数,即

$$k_r = R_{ac}/R_{dc} \quad (9)$$

式中: k_r 为绕组电阻的增大系数; R_{ac} 为交流等效电阻; R_{dc} 为直流电阻。

对于定子绕组电阻增大系数的数值计算,利用有限元法对定子绕组槽内磁场分布和股线电流密度分布进行分析,然后根据电流密度与电阻之间的关系,对定子绕组电阻损耗增大系数进行数值计算,其计算公式如下^[17]:

$$k_r = \frac{\iint_{S_c} |J_z|^2 ds}{J_{sz}^2 S_b} = \frac{\sum_{e=1}^E (J_{er}^2 + J_{el}^2) \Delta_e}{J_{sz}^2 S_b} \quad (10)$$

式中: S_b 为股线截面积; J_z 为单元内复电流密度; J_{sz} 为定子绕组源电密; J_{er}, J_{el} 为单元复电密的实部和虚部; Δ_e 为单元 e 的面积。

进而得到永磁风力发电机中槽内直线端绕组的交流铜损耗为

$$P_{cc} = (I/N_c)^2 (R_{ac} - R_{dc}) \quad (11)$$

1.3.4 槽内绕组的环流损耗

电机定子槽内临近槽口位置的股线和靠近槽底位置的股线交链不同磁链,各股线感应出来存在差异的电动势,股线回路中会生成环流,环流作用在股线电阻上产生环流损耗。目前求解绕组环流损耗常用的方法是有限元法,求解绕组环流损耗需先计算每根股线电流值,并联股线网络拓扑如图1所示。

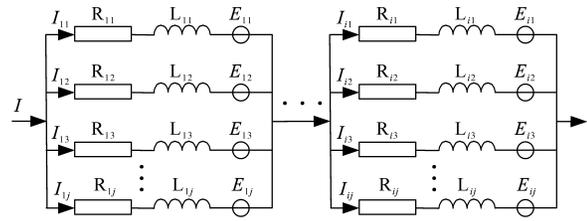


图1 并联股线网络拓扑图

Fig.1 Topology diagram of parallel stranded wire network

图1中, I 为流入该支路的总电流, I_{ij} 为第 i 个并联回路中第 j 根股线的电流, R_{ij} 为第 i 个并联回路中第 j 根股线的电阻, L_{ij} 为第 i 个并联回路中第 j 根股线的电感,每根股线上的环流计算公式如下:

$$I_{kl} = I_{ij} - I_a \quad (12)$$

式中: I_a 为股线的平均电流值。

根据基尔霍夫等效定律,可知:

$$\begin{cases} U = E_i + RI_i \\ I = \sum_{i=1}^n I_i \end{cases} \quad (13)$$

式中: R 为每根股线的电阻; I_i 为第 i 根股线的电流; E_i 为第 i 根股线上的感应电动势。

在理想情况下,股线不受到槽内漏磁通的影响,每根并联股线中的电流完全一致,其电流均为 I_a 。

槽漏磁影响下,考虑环流的损耗可表示为

$$P_{cc} = \sum_{i=1}^n |I_{ij} - I_a|^2 R_{ac} \quad (14)$$

1.3.5 永磁风力发电机的绕组综合损耗

综合考虑上述端部绕组、直线段绕组的直流铜损耗、涡流铜损耗和环流铜损耗,得到永磁风力发电机的绕组损耗的计算表达式为

$$P_{ac} = P_{end} + P_{dc} + P_{cc} + P_{ec} \quad (15)$$

2 电磁损耗分离计算及分析

半直驱永磁风力发电机基本参数如下:功率6.5 MW,转速684.7 rad/s,额定电压1 400 V,额定电流3 120 A,额定频率68.47 Hz,定子外径2 100 mm,极数12,槽数180,变流器开关频率2 kHz,永磁体牌号42SH,铁心材料50WW270。根据电机电磁损耗的理论分析及有限元计算结果对半直驱永磁风力发电机电磁损耗进行分离计算和分析。本节采用ANSYS Electronics Desktop 2020R1软件计算铁心损耗、永磁体涡流损耗以及绕组铜耗,并结合Matlab软件对计算数据进行后处理并用图形的方式表示出来。由于永磁风力发电机绕

组端部接全控开关器件进行整流控制,绕组中必然存在高频电流,因此有限元计算时,绕组内加入了幅值 50 A、频率 1.5 kHz 的高频电流信号。

2.1 铁心损耗

铁耗主要是由于铁心中磁密发生变化导致的损耗,因此磁密是计算铁心损耗的关键。本部分将着重针对 6.5 MW 半直驱永磁风力发电机的气隙磁密、定子和转子磁密进行计算和分析。永磁风力发电机的气隙磁密云图如图 2 所示。

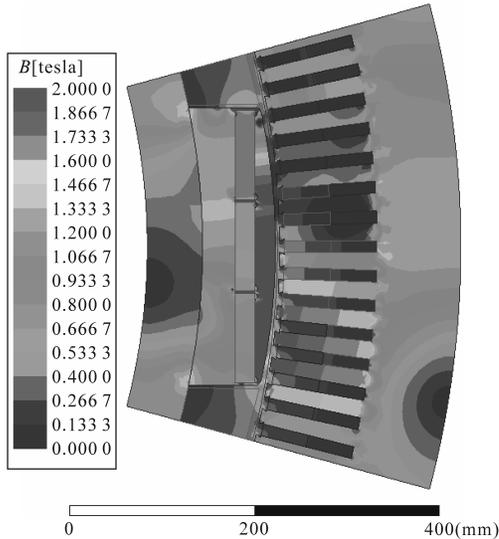


图2 半直驱永磁风力发电机磁密云图

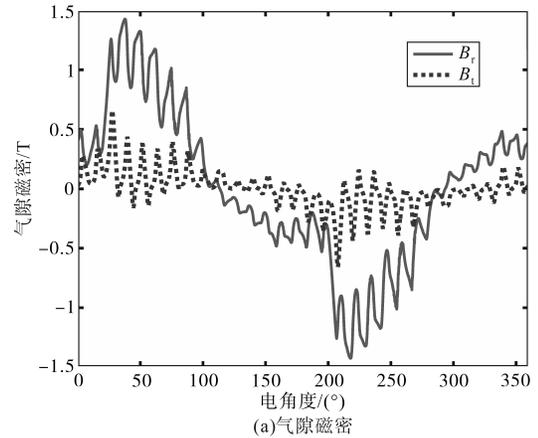
Fig.2 Map of semi-direct driven permanent magnet wind generator flux density

气隙中间的空间磁密如图 3 所示,对气隙磁密进行径向和切向分解:实线为径向磁密、虚线为切向磁密。由图 3a 可见,在负载电枢反应磁场和开口槽的影响下,磁密总体波形畸变率较高。根据图 3b 可知,基波幅值 0.829 T,谐波总畸变率为 43.3%。

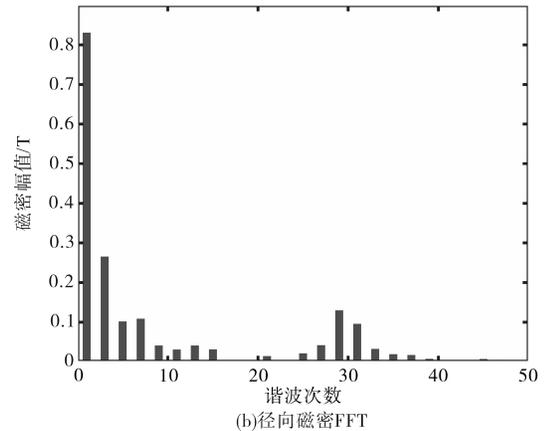
铁心中的磁密直接影响铁耗,磁密随时间和空间变化非常重要。定子和转子内的特殊部位点 A、点 B、点 C 和线 L 在电机铁心中的位置分布如图 4 所示。

转子铁心中 A 点随转子旋转的磁密如图 5 所示:实线为 A 点随转子旋转的径向磁密,虚线为 A 点随转子旋转的切向磁密。径向磁密零次幅值 0.485 T,30 次谐波的幅值(槽谐波)最大,其值 0.132 T;切向磁密零次幅值 1.997 T,30 次谐波的幅值(槽谐波)最大,其值为 0.060 T。由此可见,转子铁心磁密的周期性变化受开口槽导致的槽谐波影响最大。

定子齿部 B 点随转子旋转的磁密如图 6 所



(a)气隙磁密



(b)径向磁密FFT

图3 气隙中间的空间磁密

Fig.3 Space flux density in the middle of air gap

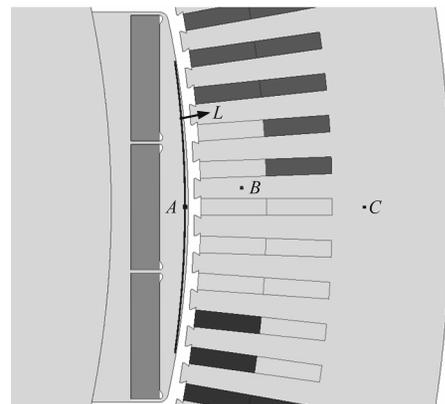


图4 点A、点B、点C在电机铁心中的位置分布图

Fig.4 Location of points A,B and C in the iron core

示:实线为 B 点随转子旋转的径向磁密,虚线为 B 点随转子旋转的切向磁密;径向磁密基波幅值 1.516 T,3 次和 5 次谐波的幅值最大,其值分别为 0.219 T 和 0.117 T;切向磁密基波幅值 0.219 T,3 次和 5 次谐波的幅值最大,其值均为 0.009 T。由此可见,定子铁心 B 点(齿部)磁密周期性变化主要受主磁场和电枢反应磁场影响。

定子轭部 C 点随转子旋转的磁密如图 7 所示:实线为 C 点随转子旋转的径向磁密,虚线为 C 点随转子旋转的切向磁密;径向磁密基波幅值

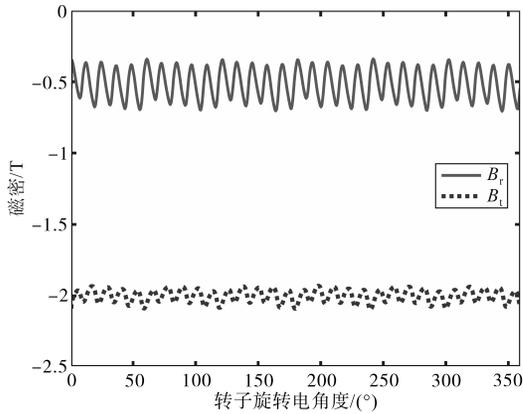


图5 转子铁心中A点随转子旋转的磁密

Fig.5 Flux density of point A rotating with the rotor

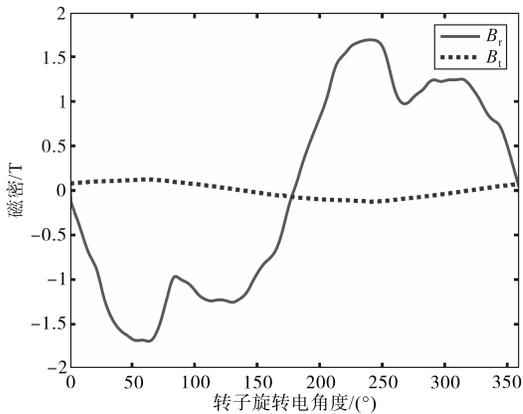


图6 定子齿部B点随转子旋转的磁密

Fig.6 Flux density at point B of the stator teeth as rotor rotates

0.468 T,3次和5次谐波的幅值最大,其值分别为0.138 T和0.084 T;切向磁密基波幅值1.386 T,3次谐波的幅值最大,其值为0.136 T。由此可见,定子铁心C点(轭部)磁密的周期性变化主要受主磁场和电枢反应磁场影响。

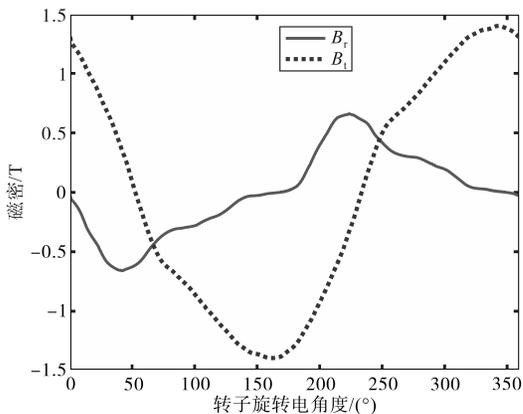


图7 定子轭部C点随转子旋转的磁密

Fig.7 Flux density at point C of the stator yoke as rotor rotates

从铁耗计算公式可知,电磁频率对铁耗影响很大。本研究将主要以改变电机转速的方式改变电磁基波频率,半直驱永磁风力发电机额定转速为684.7 r/min,电磁基波频率为68.47 Hz,电磁

频率对铁耗的影响如图8所示,最低转速为额定转速的20%,最高转速为额定转速的1.2倍。定子铁耗为柱状图下部分深色所示,转子铁耗为柱状图上部分浅色所示。转速(电磁频率)越高,铁耗越大,总损耗从3.8 kW增大到37.6 kW,其中额定转速684.7 r/min下的总铁耗为30.13 kW(定子铁耗28 kW,转子铁耗2.13 kW)。

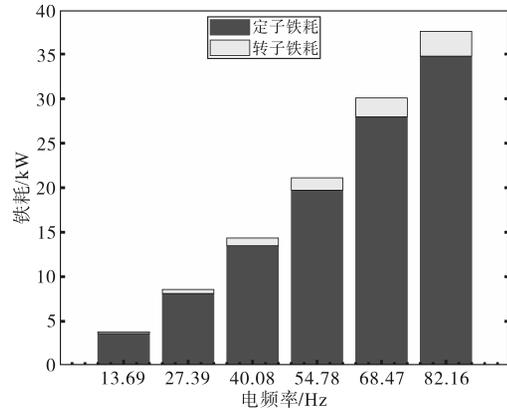


图8 电磁频率对铁耗的影响

Fig.8 The influence of electromagnetic frequency on iron loss

2.2 永磁体涡流损耗

由图2可知,永磁体与气隙之间的转子铁心磁密饱和度很高,电枢反应磁场穿透此部分铁心,对永磁体的影响更大,产生的涡流损耗也将更大,而且电枢反应对三块永磁体的作用大小不同,上面永磁体受电枢反应影响导致磁密减小最多,下面永磁体受电枢反应影响导致磁密增加最多。电频率对永磁体涡流损耗的影响如图9所示,通过改变电机转速来研究发电机电磁基波频率对永磁体涡流损耗的影响,永磁体涡流损耗随电频率增加而增大,额定转速下的永磁体涡流损耗为2.09 kW。

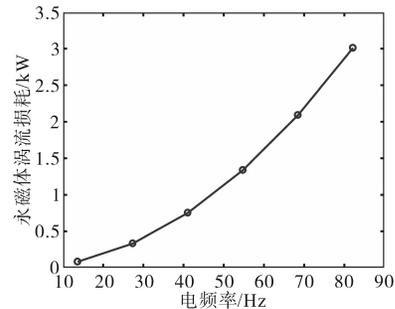


图9 电频率对永磁体涡流损耗的影响

Fig.9 The influence of electromagnetic frequency on eddy loss of permanent magnet

2.3 绕组铜耗

2.3.1 绕组直流铜耗计算

永磁风力发电机的直流电阻,包含槽内直线

段和槽外绕组端部。计算得到在 120 ℃条件下,电机的直线段(铁心轴向长度)导体直流电阻为 0.77 mΩ,槽外绕组端部的直流电阻为 1.05 mΩ,单相绕组的总直流电阻为 1.82 mΩ。

基于热态下的直流电阻,结合额定电流数据 3 120 A,得到永磁风力发电机热态下的直流绕组铜耗为 53.15 kW。

2.3.2 绕组交流损耗计算

根据有限元仿真计算结果和式(10)~式(11)计算得到永磁风力发电机槽内直线段导体的交流等效电阻随频率的变化规律。根据计算结果,在额定电流条件下(3 120 A, 68.47 Hz, 2 kHz 开关频率),直线段的等效热态电阻为 1.15 mΩ,对应的交流等效铜耗为 33.58 kW。

2.3.3 绕组环流损耗计算

运用场路耦合有限元法求解股线电流有效值,第一层为靠近槽口的单匝绕组、第十层为靠近槽底的单匝绕组。第一至三层绕组股线电流相较于第四至十层绕组股线电流分布更不均衡,尤其是第一层中八根股线的股线电流分布最不平衡,这是因为开口槽第一层绕组位置的槽口漏磁严重造成的。将第一层、第五层、第六层和第十层的计算数据绘制为曲线,如图 10 所示。可以看出,除第一层的股线电流分布不均匀外,第五层的第 7 股、第 8 股、第六层股线第 1 股、第 2 股对应的股线电流较大,这四根股线在相应的每层绕组中相较于其他股线均处于靠近层间绝缘的位置,股线位置漏磁偏大。

根据式(14),计算得到永磁风力发电机的绕组内部环流损耗的近似数值为 6.71 kW。

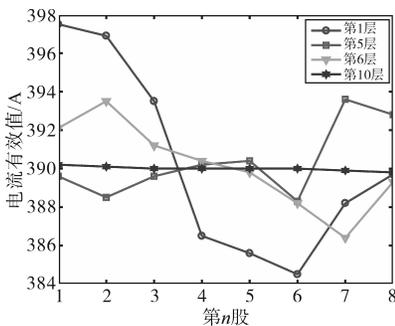


图 10 绕组内各个股线内电流分布情况

Fig.10 Current distribution of each stranded wire in the winding

2.3.4 额定负载下永磁风力发电机的绕组总损耗

综合考虑上述端部绕组、直线段绕组的直流铜损耗、涡流铜损耗和环流铜损耗,得到 6.5 MW 半直驱永磁风力发电机额定负载状态下的绕组

端部直流铜耗为 30.66 kW、槽内直线段与端部绕组的环流损耗为 6.71 kW、槽内直线段铜耗为 33.58 kW,于是半直驱永磁风力发电机绕组总损耗为 70.95 kW,较直流电阻计算的直流铜耗增大了 33.49%,其中槽内直线段导体的增幅明显。

3 结论

半直驱永磁风力发电机是风力发电机组的重要组成部分,为了能够更加准确地计算和分析发电机电磁损耗,本文将电磁损耗的各部分组成情况进行详细的分离研究。得到考虑谐波电流和铁心饱和的铁心损耗、永磁体涡流损耗、绕组损耗(绕组直流铜耗、交流铜耗、环流铜耗)的理论计算公式。结合理论计算公式和有限元法,得到 6.5 MW 半直驱永磁风力发电机的电磁损耗计算结果。本文所研究的电磁损耗分离计算结果有利于更精准地指导半直驱永磁风力发电机电磁设计工作,推进风力发电机组的技术进步。

参考文献

- [1] 程明,张建忠,王念春. 可再生能源发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
CHENG Ming, ZHANG Jianzhong, WANG Nianchun. Renewable energy generation technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [2] 朱博文. 10 MW 永磁半直驱中速风力发电机优化设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2021.
ZHU Bowen. Optimized design of 10 MW permanent magnet semi-direct drive medium-speed wind turbine[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [3] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 621-630.
- [4] POPESCU M, IONEL D M. A best-fit model of power losses in cold rolled-motor lamination steel operating in a wide range of frequency and magnetization[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1753-1756.
- [5] IONEL D M, POPESCU M, DELLINGER S J, et al. On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3): 658-667.
- [6] LAVERS J D. A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1978, 14(5): 386-388.
- [7] MA J, ZHU Z Q. Magnet eddy current loss reduction in permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1309-1320.
- [8] ZHANG Z M, DENG Z Q, SUN Q G, et al. Analytical modeling

- and experimental validation of rotor harmonic eddy-current loss in high-speed surface-mounted permanent magnet motors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(2):1593-1602.
- [9] 朱龙飞,祝天利,于慎波,等.一种气隙磁导谐波引起的永磁体涡流损耗的解析计算方法[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(5):10-17.
ZHU Longfei, ZHU Tianli, YU Shenbo, et al. Analytical approach for calculation of eddy current losses in magnets caused by permeance harmonics in air gap[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(5):10-17.
- [10] 孙权贵,邓智泉,张忠明.基于齿槽效应的高速永磁电机转子涡流损耗解析计算[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(9):1994-2004.
SUN Quanguai, DENG Zhiqian, ZHANG Zhongming. Analytical calculation of rotor eddy current losses in high speed permanent magnet machines accounting for influence of slot opening [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(9):1994-2004.
- [11] ZHAO Y, LI D W, PEI T H, et al. Overview of the rectangular wire windings AC electrical machine[J]. *CES Transactions on Electrical Machines & Systems*, 2019, 3(2):160-169.
- [12] 周登,姚缨英.多截面场路耦合法和解析法对比分析水轮机定子绕组4种换位下的环流[J]. *机电工程*, 2015, 32(12):1600-1605.
ZHOU Deng, YAO Yingying. Comparison of multi-section method coupled field-circuit and analytical method for the analysis of the circulating current of 4 kinds of transposition in the stator of a hydraulic turbine[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(12):1600-1605.
- [13] GOLOVANOV D, GERADA C. Analytical methodology for modelling of circulating current loss in synchronous electrical machines with permanent magnets[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 37(1):220-231.
- [14] JIANG Y P, CHEN J Q, WANG H H, et al. Semi-analytical method of form-wound winding loss considering circulating current effect[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2022, 58(2):5888-5896.
- [15] 陈萍,唐任远,佟文明,等.高功率密度永磁同步电机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(6):7-15.
CHEN Ping, TANG Renyuan, TONG Wenming, et al. Permanent magnet eddy current Loss and its influence of high power density permanent magnet synchronous motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6):7-15.
- [16] NAIR S S, WANG J, CHIN R, et al. Analytical prediction of 3-D magnet eddy current losses in surface mounted PM machines accounting slotting effect[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2):414-423.
- [17] 柴峰.大型同步发电机定子绕组涡流损耗的理论分析与计算[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.
CHAI Feng. Theoretical analysis and calculation of eddy loss in stator winding of large synchronous generator[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009.

收稿日期:2025-01-14

修改稿日期:2025-02-24