

爪极发电机空载漏磁计算

倪有源, 王群京, 张学

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

Magnetic Leakage Computation of Claw-pole Alternators Under No-load

NI You-yuan, WANG Qun-jing, ZHANG Xue

(School of Electrical Engineering & Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The magnetic leakage factors of two types of claw-pole alternators were computed using a three-dimensional (3-D) finite element(FE) method. The shape of the claws leads to a truly 3-D magnetic field in all regions. Consequently, for the correct calculation of magnetic field and alternator characteristics, a 3-D numerical method is required. On the basis of preproccession, solution and postproccession, the magnetic leakage factors of the alternators under no-load conditions in terms of different structure parameters were computed. Finally the results of variation trend of magnetic leakage factors were presented. The main conclusions are helpful to the structure design, magnetic leakage computation and to the optimal design of the claw-pole alternators.

KEY WORDS: three-dimensional finite element; hybrid excitation; claw-pole alternator; magnetic leakage factor; no-load

摘要: 用三维有限元方法计算一台电励磁爪极发电机和一台新型混合励磁爪极发电机漏磁系数。爪极结构的特殊性决定了爪极发电机磁场呈三维分布, 需用三维数值方法计算。采用有限元商用软件包通过前处理、加载和后处理等程序, 得到电励磁爪极发电机和混合励磁爪极发电机不同结构参数下的空载漏磁系数, 并总结出不同结构参数下漏磁系数的变化规律, 对于不同类型爪极发电机的结构设计、磁场分析及参数优化设计等方面的研究提供一定的理论参考。

关键词: 三维有限元; 混合励磁; 爪极发电机; 漏磁系数; 空载

0 引言

爪极发电机由于制造简单且成本低而广泛应用于各种场合, 但是电励磁爪极发电机存在极间漏磁大、低速输出特性差、效率低等缺点, 因此有必要对其进行改进和优化。混合励磁爪极发电机, 采用永磁励磁和电励磁相结合的励磁方式, 兼有永磁

发电机和电励磁发电机的优点, 可以解决永磁发电机磁场不可调节的缺点, 通过电励磁的调节, 以使发电机在转速及负载变化范围内, 满足输出恒定电压的技术要求, 因此对混合励磁爪极发电机的研究也具有很重要的理论价值和工程价值。本文中的永磁体放置于爪极间, 永磁磁钢的作用主要是增加主磁通和减少爪极间的漏磁通, 因此混合励磁爪极发电机可以提高输出特性和效率。有限元方法作为一种有效的数值计算方法, 其计算精度很高, 适合求解此类三维电磁场问题。

国外对于爪极发电机三维磁场有限元分析开展了相关研究^[1-5]。国内也有相关研究, 如有限元法计算爪极发电机极间漏磁率和极轴漏磁率^[6], 计算电励磁爪极发电机空载漏磁^[7-8]。本文采用有限元商用软件包Ansys计算一台 28 V电励磁爪极发电机以及一台 28 V混合励磁爪极发电机在不同结构参数下的空载漏磁系数, 进一步得出变化规律, 为爪极发电机以及混合励磁爪极发电机的结构设计、漏磁计算、优化设计提供一定的理论参考。

1 电励磁爪极发电机

电励磁爪极发电机的主磁路由转子磁轭、爪极、气隙、定子齿和定子磁轭几部分组成^[9]。整体模型如图 1 所示。图 2 所示为一个极距下的空载磁场分布, 主磁通路径如下: 励磁电流产生轴向磁通经转子磁轭到达爪极, 转子将轴向磁通转换为径向磁通, 然后经气隙、定子齿、定子磁轭到达另一个极, 再经过另一个极下的定子齿、气隙和爪极, 回到转子磁轭, 形成一个闭合回路。

电励磁爪极发电机的极间漏磁很大, 为进一步分析爪极发电机, 需要分析计算其极间漏磁系数。采用的方法是三维有限元方法。求解域为一极电机

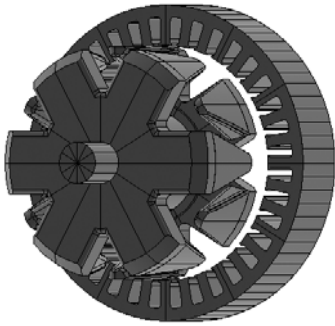


图 1 爪极电机的整体模型
Fig. 1 Geometry of a claw-pole alternator

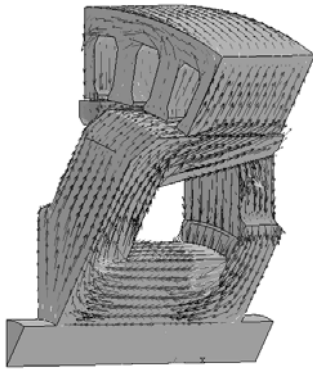


图 2 一个极距磁场分布
Fig. 2 Flux flow in one pole-pitch

模型，在周期性对称面上，边界条件满足^[3]

$$B_{r,\varphi}(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = -B_{r,\varphi}(r, \varphi, z) \quad (1)$$

$$B_z(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = B_z(r, \varphi, z) \quad (2)$$

式中： B_r 、 B_φ 、 B_z 分别为磁通密度 \mathbf{B} 在柱坐标系下的 3 个分量； r 、 φ 、 z 分别为任一坐标在柱坐标系下的 3 个分量； $\Delta\varphi$ 为一个极距角。

由于

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \left\{ \frac{1}{r} \frac{dA}{d\theta} \cdot z - \frac{dA}{dz} \cdot \theta \right\} \mathbf{u}_r + \left\{ \frac{dA}{dz} \cdot r - \frac{dA}{dr} \cdot z \right\} \mathbf{u}_\theta + \frac{1}{r} \left\{ \frac{d}{dr} (r \cdot A_\theta) - \frac{dA}{d\theta} \cdot r \right\} \mathbf{u}_z \quad (3)$$

因此可以得到

$$A_r(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = A_r(r, \varphi, z) \quad (4)$$

$$A_\varphi(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = A_\varphi(r, \varphi, z) \quad (5)$$

$$A_z(r, \varphi + \Delta\varphi, -z) = -A_z(r, \varphi, z) \quad (6)$$

式中： \mathbf{A} 为磁矢位； A_r 、 A_φ 、 A_z 是磁矢位 \mathbf{A} 在柱坐标系下的 3 个分量。

根据斯托克斯定理，可得^[5]

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \oint_l \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \quad (7)$$

式中： Φ 为磁通量； S 为任意曲面的面积； l 为曲面 S 的边界。式中通过曲面 S 的磁通量等于磁矢位沿这个面的边界的闭合线积分。

大多文献一般采用 B 计算磁通，这里采用 B 计算磁通有很大难度，故采用磁矢位沿面的边界闭合线积分的方法，该方法简单易行，只需在Ansys计算中采用节点元并选择合适的闭合路径，每个单元的节点处有 A_x 、 A_y 和 A_z 3 个自由度。图 3 所示为用磁矢位有限元方法计算得到的电机空载时铁心磁场分布。

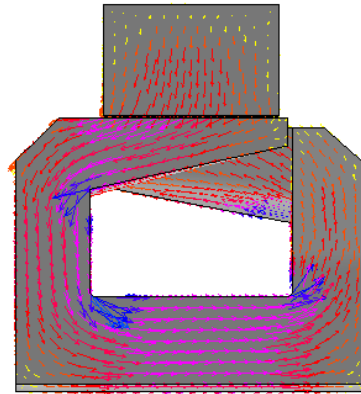


图 3 铁心磁场分布
Fig. 3 Flux flow in the iron core

2 空载漏磁计算

计算过程中选取定子外径、定子铁心有效长度、定子槽半径、定子内径、转子外径和转子铁心内径为设计变量，因为这些变量与电机磁路的磁阻有直接的关系。当这些变量发生变化时，相应磁路的磁阻也会发生变化。其中定子内径和转子外径的差即为气隙长度，而气隙大小对电机磁路的影响至关重要，故通常作为设计调整变量。为分析比较这些变量对漏磁的影响程度，分别计算只有一个变量变化时的电机空载漏磁系数。在有限元计算中，计算结果和收敛速度都与单元网格剖分精度、收敛精度直接相关。由于空载漏磁系数随结构参数变化数值范围较小，而三维有限元的计算精度与其空间离散化密度密切相关。故在Ansys 计算中，剖分单元为四面体单元，网格剖分精度保持不变，收敛精度设为 0.001。

表 1 为定子外径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表 1 可知，随着定子外径的增大，电机每极总磁通和有效磁通总体趋势是增加，但漏磁系数总体趋势却减小了。

表 2 为定子铁心有效长度对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表 2 可知，随着定子铁心有效长度的增大，电机每极总磁通和有效磁通都有所增加，但漏磁系数却减小了。

表 3 为定子槽半径对电励磁爪极发电机漏磁系

数的影响。由表3可知,随着定子槽半径的增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所减小,但漏磁系数却增大了。

表4为定子内径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表4可知,随着定子内径的增大,即气隙逐渐增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所减

小,但漏磁系数却增大了。

表5为转子外径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表5可知,随着转子外径的增大,即气隙逐渐减小,电机每极总磁通和有效磁通都有所增加,但漏磁系数却减小了。

表6为转子铁心内径对电励磁爪极发电机漏磁

表1 定子外径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 1 Magnetic leakage factor versus the outer radius of the stator

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.062	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.492	4.190	1.549
0.063	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.585	4.275	1.540
0.064	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.581	4.280	1.538
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.648	4.338	1.533
0.066	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.667	4.357	1.530
0.067	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.689	4.370	1.531
0.068	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.689	4.378	1.528
0.070	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.687	4.375	1.528

表2 定子铁心有效长度对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 2 Magnetic leakage factor versus the length of the stator iron core

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.024	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.303	3.998	1.577
0.065	0.025	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.531	4.218	1.548
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.648	4.338	1.533
0.065	0.027	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.809	4.486	1.518
0.065	0.028	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.918	4.592	1.507

表3 定子槽半径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 3 Magnetic leakage factor versus the radius of the stator slot

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.059	0.048 4	0.048	0.008 5	6.692	4.383	1.527
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.648	4.338	1.533
0.065	0.026	0.061	0.048 4	0.048	0.008 5	6.591	4.276	1.541
0.065	0.026	0.062	0.048 4	0.048	0.008 5	6.551	4.231	1.548
0.065	0.026	0.063	0.048 4	0.048	0.008 5	6.496	4.161	1.561

表4 定子内径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 4 Magnetic leakage factor versus the inner radius of the stator

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.060	0.048 2	0.048	0.008 5	7.637	5.463	1.398
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.648	4.338	1.533
0.065	0.026	0.060	0.048 6	0.048	0.008 5	6.083	3.678	1.654
0.065	0.026	0.060	0.048 8	0.048	0.008 5	5.294	2.848	1.859

表5 转子外径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 5 Magnetic leakage factor versus the outer radius of the rotor

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.060	0.0484	0.047 6	0.008 5	5.515	3.075	1.793
0.065	0.026	0.060	0.0484	0.047 8	0.008 5	6.047	3.652	1.656
0.065	0.026	0.060	0.0484	0.048 0	0.008 5	6.648	4.338	1.533
0.065	0.026	0.060	0.0484	0.048 2	0.008 5	7.531	5.359	1.405

表 6 转子铁心内径对电励磁爪极发电机漏磁系数的影响
Tab. 6 Magnetic leakage factor versus the inner radius of the rotor iron core

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.007 5	6.644	4.332	1.534
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.008 5	6.648	4.338	1.533
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.009 5	6.652	4.340	1.533
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.010 5	6.657	4.336	1.535
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.011 5	6.644	4.330	1.534

系数的影响。由表 6 可知，随着转子铁心内径的增大，电机每极总磁通和有效磁通变化量很小，而且漏磁系数几乎没有变化。

3 混合励磁爪极发电机

为了进一步分析优化爪极发电机，采用混合励磁爪极发电机^[10]。图 4 所示的混合励磁爪极发电机定子包括铁心和三相绕组，转子包括 6 对爪极、轴、励磁绕组和永磁体。其中永磁体材料为钕铁硼，放置在爪极间，磁化方向为切向，永磁体的作用主要是增加主磁通和减少爪极间的漏磁通。空载时一对极下的主磁通是由 2 部分磁通并联组成，一部分是励磁绕组中的励磁电流产生的主磁通，路径如下：主磁通经爪极N极、气隙、定子齿到达定子轭，再经定子齿、气隙到达爪极S极，经过转子磁轭，回到爪极N极，从而形成一个回路。另一部分是永磁体产生的主磁通，路径如下：主磁通经永磁体N极、爪极N极、气隙、定子齿到达定子轭，再经定子齿、气隙到达爪极S极，经过永磁体S极回到永磁体N极，也形成一个回路。负载时主磁通除了上述主磁通之外，还有定子绕组中三相电流产生的主磁通。

为了和电励磁爪极发电机相比较，需要分析计算混合励磁爪极发电机空载漏磁系数。采用的方法仍然是三维有限元方法。求解域为一极电机模型，在周期性对称面上，边界条件依然满足式(1)~(2)。

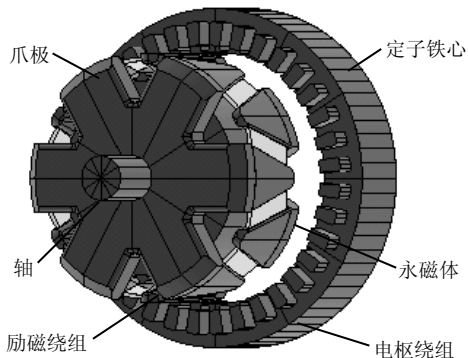


图 4 混合励磁爪极发电机结构
Fig. 4 Geometry of a hybrid excitation claw-pole alternator

计算磁通的方法与前述一样，即采用磁矢位沿面的边界闭合线积分的方法，即式(7)。图 5 所示为用磁矢位方法计算得到的混合励磁爪极发电机空载时铁心磁场分布。和图 3 比较可以看出，气隙附近处磁密明显加强。

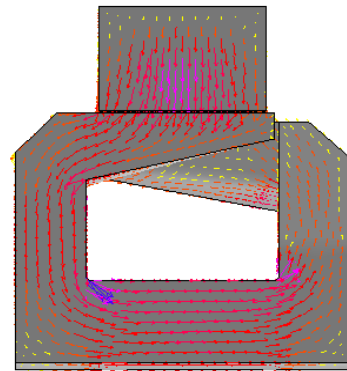


图 5 铁心磁场分布
Fig. 5 Flux flow in the iron core

4 空载漏磁计算

为了和电励磁爪极发电机漏磁计算进行比较，计算过程中依然选取定子外径、定子铁心有效长度、定子槽半径、定子内径、转子外径和转子铁心内径为设计变量，分别计算每个变量值变化情况下的电机空载漏磁系数。永磁体材料为钕铁硼，长度为 20.9 mm，厚度为 2.5 mm。

表 7 为定子外径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表 7 可知，随着定子外径的增大，电机每极总磁通和有效磁通总体趋势是增加，但漏磁系数总体趋势却减小了。与表 1 比较可知，对相同结构参数的 2 种电机，混合励磁爪极发电机的漏磁系数明显减小。

表 8 为定子铁心有效长度对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表 8 可知，随着定子铁心有效长度的增大，电机每极总磁通和有效磁通都有所增加，但漏磁系数却减小了。与表 2 比较可知，对相同结构参数的 2 种电机，混合励磁爪极发电机的漏磁系数明显减小。

表9为定子槽半径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表9可知,随着定子槽半径的增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所减小,但漏磁系数却增大了。与表3比较可知,对相同结构参数的2种电机,混合励磁爪极发电机的漏磁系数明显减小。

表10为定子内径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表10可知,随着定子内径的增大,即气隙逐渐增大,电机每极总磁通和有效磁通都有所减小,但漏磁系数却增大了。与表4比较可知,

对相同结构参数的2种电机,混合励磁爪极发电机的漏磁系数明显减小。

表11为转子外径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响。由表11可知,随着转子外径的增大,即气隙逐渐减小,电机每极总磁通和有效磁通都有所增加,但漏磁系数却减小了。与表5比较可知,对相同结构参数的2种电机,混合励磁爪极发电机的漏磁系数明显减小。

表12为转子铁心内径对混合励磁爪极发电机

表7 定子外径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 7 Magnetic leakage factor versus the outer radius of the stator

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.063	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.553	4.660	1.406
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.619	4.724	1.401
0.067	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.678	4.773	1.399
0.070	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.713	4.808	1.396

表8 定子铁心有效长度对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 8 Magnetic leakage factor versus the length of the stator iron core

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.024	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.348	4.468	1.421
0.065	0.025	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.507	4.626	1.407
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.619	4.724	1.401
0.065	0.027	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.779	4.893	1.385
0.065	0.028	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.895	5.000	1.379

表9 定子槽半径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 9 Magnetic leakage factor versus the radius of the stator slot

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.059	0.048 4	0.048	0.008 5	6.672	4.783	1.395
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.619	4.724	1.401
0.065	0.026	0.061	0.048 4	0.048	0.008 5	6.578	4.674	1.407
0.065	0.026	0.062	0.048 4	0.048	0.008 5	6.532	4.617	1.415
0.065	0.026	0.063	0.048 4	0.048	0.008 5	6.443	4.526	1.424

表10 定子内径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 10 Magnetic leakage factor versus the inner radius of the stator

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.060	0.048 2	0.048	0.008 5	7.644	5.894	1.297
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048	0.008 5	6.619	4.724	1.401
0.065	0.026	0.060	0.048 6	0.048	0.008 5	5.901	3.911	1.509
0.065	0.026	0.060	0.048 8	0.048	0.008 5	5.451	3.391	1.607

表11 转子外径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 11 Magnetic leakage factor versus the outer radius of the rotor

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.047 6	0.008 5	5.436	3.375	1.611
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.047 8	0.008 5	5.914	3.931	1.504
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.008 5	6.619	4.724	1.401
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 2	0.008 5	7.671	5.938	1.292

表 12 转子铁心内径对混合励磁爪极发电机漏磁系数的影响

Tab. 12 Magnetic leakage factor versus the inner radius of the rotor iron core

定子 外径/m	定子铁心 有效长度/m	定子槽 半径/m	定子 内径/m	转子 外径/m	转子铁心 内径/m	每极总磁 通/ 10^{-5} Wb	每极有效 磁通/ 10^{-5} Wb	漏磁 系数
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.007 5	6.626	4.729	1.401
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.008 5	6.619	4.724	1.401
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.009 5	6.622	4.725	1.401
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.010 5	6.631	4.720	1.405
0.065	0.026	0.060	0.048 4	0.048 0	0.011 5	6.612	4.720	1.401

漏磁系数的影响。由表 12 可知，随着转子铁心内径的增大，电机每极总磁通和有效磁通变化量很小，而且漏磁系数几乎没有变化。与表 6 比较可知，对相同结构参数的 2 种电机，混合励磁爪极发电机的漏磁系数明显减小。

5 结论

改变电励磁爪极发电机、混合励磁爪极发电机的不同结构参数，计算相应的发电机空载磁场，采用磁矢位沿面的边界闭合线积分计算得到每极总磁通和每极有效磁通，进而得到空载漏磁系数。对于这 2 类电机，由漏磁系数的变化可得出如下规律：电机漏磁率相对定子外径、定子铁心有效长度和转子外径均呈负增长；电机漏磁率相对定子槽半径和定子内径则均呈正增长；电机漏磁率相对于转子铁心内径几乎没有变化。

和相同结构参数的电励磁爪极发电机相比，混合励磁爪极发电机的空载漏磁系数明显减小，有效改进了电励磁爪极发电机电极间漏磁大的缺点。为减小漏磁带来的负面影响，进一步改进发电机输出特性、提高发电机效率奠定了基础。需要指出的是，混合励磁爪极发电机空载漏磁系数与永磁体结构尺寸以及永磁体参数有直接关系。

通过计算其他规格的爪极发电机，上述规律保持不变，因此上述规律同样适用于其他规格的爪极发电机，对于爪极发电机的结构设计、电磁场计算、优化爪极发电机和混合励磁爪极发电机结构参数等提供一定的理论基础，具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Kaehler C, Gerhard H. Transient 3-D FEM computation of eddy-current losses in the rotor of a claw-pole alternator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1362-1365.
- [2] Demerdash N A, Nehl T W, Fouad F A. Finite element formulation and analysis of three dimensional magnetic field problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1980, 16(2): 1092-1094.
- [3] Ramesohl I, Henneberger G, Küppers S, et al. Three dimensional calculation of magnetic forces and displacements of a claw-pole generator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3):

1685-1688.

- [4] Küppers S, Henneberger G. Numerical procedures for the calculation and design of automotive alternators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(2): 2022-2025.
- [5] Brauer J R, Zimmerlee G A, Bush T A, et al. 3D finite element analysis of automotive alternators under any load[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 500-503.
- [6] 陈妮, 陈传森. 爪极发电机漏磁的有限元分析[J]. 工程数学学报, 2004, 21(1): 1-6.
Chen Wei, Chen Chuanmiao. Leakage analysis of claw-shaped pole electric machine using FEM[J]. Journal of Engineering Mathematic, 2004, 21(1): 1-6(in Chinese).
- [7] 鲍晓华, 王群京, 倪有源, 等. 爪极发电机建模及参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 138-142.
Bao Xiaohua, Wang Qunjing, Ni Youyuan, et al. Modeling and parameters optimal design of claw-pole alternator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 138-142(in Chinese).
- [8] 朱卫国, 倪有源, 王群京. 用有限元方法分析计算爪极发电机空载漏磁[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11): 208-210.
Zhu Weiguo, Ni Youyuan, Wang Qunjing. Leakage magnetic computation of brushless claw-pole alternators based on FEM [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 208-210(in Chinese).
- [9] 王群京, 马飞, 李国丽, 等. 爪极电机空载时三维磁场的数值分析和电感计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 38-42.
Wang Qunjing, Ma Fei, Li Guoli, et al. The analysis and calculations on 3-dimensional field and inductance of a claw-pole alternators under no-load[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 38-42(in Chinese).
- [10] 王群京, 倪有源, 张学, 等. 基于三维等效磁网络法计算混合励磁爪极发电机负载特性[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6): 96-100.
Wang Qunjing, Ni Youyuan, Zhang Xue, et al. Load characteristics computation of a hybrid excitation claw-pole alternator using a 3-D MEC method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6): 96-100(in Chinese).



倪有源

收稿日期: 2007-12-27。

作者简介:

倪有源(1976—), 男, 博士, 研究方向为特种电机电磁场及电机控制, nyy76@163.com;
王群京(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机及其控制、电力传动以及工程电磁场计算等。

(编辑 刘浩芳)