

文章编号:1007-6492(1999)02-0027-03

无换向器电机的优化设计

辛小南

(郑州工业大学电气信息工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要:介绍了爪极式无换向器电机的设计特点,并提出采用六相 30°相带绕组来改善电机的转矩特性.选择 powell 共轭方向法的内罚函数法,以电机的有效材料的成本为目标函数对爪极无换向器电机进行优化设计,计算结果表明,电机的有效成本平均下降 13.2%.

关键词:无换向器电机; powell 共轭方向法; 内罚函数法; 外抽技术

中图分类号: TM 302 **文献标识码:** A

无换向器电机即可控硅电机是由一台同步电动机和一组逆变器(或交-交变频器)所组成的,这种电机既具有直流电动机良好的调速特性,又因没有换向器而不需要经常维修,且没有发生火花的危险.目前,用可控硅无换向器电机取代直流电动机已成为一个发展趋势^[1].

爪极式电机分为内极式和外极式两种.内极式爪极电机有一组爪极需要通过非磁性环悬挂于另一组爪极上,因此在机械上不够牢固.另外,由于该电机的外径尺寸和重量较大,所以仅用在小型电机中如汽车电机、车辆照明发电机等.

外极式电机的励磁线圈装在定子侧,可以很方便地实现电机的完全无刷化.由于滑动部分仅是轴承,因此维护方便;采用防爆密闭结构,还可用在环境比较恶劣的地方,故外极式爪极电机特别适用于可控硅无换向器电机.

1 爪极式电机的设计特点

爪极式电机的定子部分与一般的交流电机完全一样,其转子比较特殊.爪极转子的形状比较复杂,它的磁路比一般的同步电机要长,特别对于外极式爪极电机来说,磁路要通过端盖及定子支架(如图 1)闭合,因此转子漏磁种类较多,且漏磁较大.若爪极形状选择不当,漏磁系数可高达 1.4~1.5.尽管如此,由于爪极式电机的各对磁极共用一个励磁绕组,因此励磁功率比一般同步电机的励磁功率小,利用率高,需要的额定励磁功率较

小,一般只有电机额定功率的 1/60~1/80.

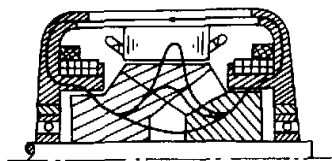


图 1 爪极电机磁路图

爪极电机中,所有磁通沿轴向流通,最后全部汇集到轭部,因而磁轭的直径受到严格的限制.一方面磁轭的直径与转子端部漏磁有密切的关系,磁轭直径大,端部漏磁大;另一方面,磁轭直径太小,将导致磁轭中的磁密较高,磁轭过于饱和.可以推导出转子磁轭直径与定子内径及气隙磁密、磁轭磁密间的关系为

$$D_a = 2\sigma\alpha_p \sqrt{\frac{B_\delta}{B_a} \cdot \frac{l_i}{D_i} + \frac{D_{2i}^2}{D_i^2}} \cdot D_i, \quad (1)$$

式中: α_p 为极弧系数; σ 为转子漏磁系数; B_δ 、 B_a 为气隙及磁轭中的磁密; l_i 为电机的有效长度; D_i 、 D_{2i} 为定、转子内径.

式(1)表明,随着 B_δ/B_a 及 D_i/D_{2i} 的增大,磁轭的直径相应增大.

2 采用六相 30°相带绕组的优越性

六相 30°相带绕组是把定子每对磁极分成 12 个相带,每个相带所占的范围为 30°电角度,然后把两个在相位上相差 180°电角度的相带反接串联

收稿日期:1998-12-30;修订日期:1999-03-28

作者简介:辛小南(1963-),女,河南省南阳市人,郑州工业大学讲师,硕士,主要从事电机设计与控制方面的研究.

或并联起来,即可得到六相 30° 相带绕组.六相 30° 相带绕组实际上相当于两个互差 30° 电角度的对称三相绕组,因此,在分析六相 30° 相带绕组的磁势时,它所产生的磁场有以下特征^[2]:

(1) 5, 7, 17, 19, ……等次谐波电流只产生 5, 7, 17, 19, ……等次谐波磁场,而不产生 1(基), 11, 13, 23, 25, ……等次谐波磁场.

(2) 11, 13, 23, 25, ……等次谐波电流只产生 1(基), 11, 13, ……等次谐波磁场,而不产生 5, 7, 17, 19, ……等次谐波磁场.

采用六相 30° 相带绕组可消除许多谐波磁势.通常交流电机定子绕组都是采用三相 60° 相带绕组,但对于无换向器电机来说,定子每相绕组中通过的不是持续电流,而是每相仅通电三分之一(对三相绕组来说)或六分之一(对六相绕组来说)个周期.因此,在每个相电流和磁场作用之下所产生的转矩是脉动的.图 2 为六相 30° 相带绕组电动机转矩脉动情况.在电枢绕组 A 和电枢绕组 B 中,当由电流 I_A 和 I_B 独立供电时, A 和 B 绕组产生的转矩 T_A 和 T_B 与三相电动机是相同的.电动机的转矩由这两个转矩合成,合成转矩为 T_e ,所以转矩脉动减小.因此,采用六相 30° 相带绕组可以减小电机转矩的脉动率.

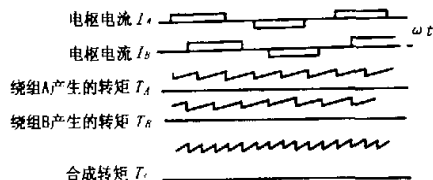


图 2 六相电动机的电磁转矩

无换向器电机定子绕组中通过的电流不是连续的正弦形电流,而是梯形断续电流,因此,在电流中除了基波外还存在大量的谐波分量.从上面对六相 30° 相带绕组磁势的分析中知道,在六相 30° 相带绕组的磁场中,许多谐波磁势是不存在的,这显著削弱了电枢反应磁场中的谐波分量,减少了损耗,从而提高了效率.另外,对产生脉动转矩影响最大的 5 次和 7 次谐波电流所产生的基波磁场在六相 30° 相带绕组中不存在,故采用六相 30° 相带绕组能抑制脉动转矩,改善转矩特性,还可提高绕组系数,从而提高材料的有效利用率.

3 爪极式无换向器电机优化设计

3.1 数学模型

工程优化问题,是在满足一定约束条件下,寻

求一组设计变量值,使目标函数达到极小值或极大值.

由于爪极式电机磁路较长,外形尺寸、重量都较大,因而其经济性设计成为一个十分有意义的研究方向.在本优化设计中,选取电机有效成本为目标函数 $f(X)$,设计变量为定子内径 D_{i1} ,铁心长 D_L ,定子齿磁密 B_{i1} ,定子电密 J_1 ,定子每槽导体数 Z ,爪极爪尖斜角 β_1 ,磁轭倾角 β_2 及极弧系数 α_p 共 8 个变量.约束条件的选取既考虑了效率、最大转矩等性能指标,又考虑了电机几何尺寸方面的限制.优化设计的数学模型为

$$\min f(X) = D_{Cu} \times G_{Cu} + D_{Fe} \times G_{Fe} + D_{Fe2} \times G_{Fe2},$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_8)^T,$$

$$\text{满足 } g_1(X) = \eta - \eta_0 \geq 0,$$

$$g_2(X) = T_M - T_M' \geq 0,$$

$$g_3(X) = J_0 - J \geq 0,$$

$$g_4(X) = AJ_0 - AJ \geq 0,$$

$$g_5(X) = 8000 - B_\delta(X) \geq 0,$$

$$g_6(X) = 16000 - B_2(X) \geq 0,$$

$$g_7(X) = \alpha_p - 0.65 \geq 0.$$

其中: D_{Cu} , D_{Fe} , D_{Fe2} 分别为铜、硅钢片、铸钢单价; G_{Cu} , G_{Fe} , G_{Fe2} 分别为铜、硅钢片、铸钢重量.

采用内罚函数法将上述有约束最优化问题转化为无约束问题后,采用 powell 共轭方向法^[3]对之进行优化.

3.2 外插技术

在罚函数法中,当罚因子 r_k 越来越小时,罚函数越来越病态(有的项分子与分母均接近于 0),使得无约束极小变得很困难.为了改进罚函数法,采用外插技术.

在罚函数法中,给定一个参数值 r_1 就可以求得函数 $P(x, r)$ 的一个极小点 X^* ,因此这个极小点可以看作是 r 的函数,记作 $X(r)$.前面已讲过当 $r \rightarrow 0$ 时, $X(r)$ 趋向于式(2)的一个极小点 X .如果函数 f, g_i 有二阶连续偏导数,则在某些条件下, $P(x, r)$ 的极小点的轨迹 $X(r)$ 在 $r=0$ 附近是一个连续函数.如果这些函数有 $K+1$ 阶导数 ($K \geq 0$),则 $X(r)$ 的 K 阶导数存在,于是 $X(r)$ 可以展开为一个关于 $r=0$ 的 Taylor 级数.这时假定对于 $r_0 > r_1 > \dots > r_p > 0$,已求得 $P(x, r)$ 的极小点 $X^{(0)}, X^{(1)}, \dots, X^{(p)}$,则可以将 $X(r)$ 近似地表示为 r 的一个 p 阶多项式

$$X(r) = \sum_{j=0}^p a_j r^j (a_j \text{ 为 } n \text{ 维向量}). \quad (2)$$

因为为 $p+1$ 个方程

$$X(k) = \sum_{j=0}^k \alpha_j (r_k)_j, j = 0, 1, \dots, p,$$

可以定出 $p+1$ 个 α_j .

在式(2)中,若令 $r=0$,可得 $X(0)=a_0$,它是最优解 X^* 的一个更好的逼近.因此,用它作为 $P(x, r)$ 下一个循环的初始点,可加速整个过程.

为保证目标函数向最优方向变化,增加了一个判别条件.如果外插后,所得目标函数比原来的好,则以外插结果作为下一轮寻优的初始点,否则,仍以原来的点作为初始点.

3.3 0.618 法进行一维寻优的收敛问题

在 powell 共轭方向法中,每次沿一个方向进行一维搜索时,采用 0.618 法.用 0.618 法进行一维寻优的一个必要条件是函数在搜寻区间内必须是凸的,也即在此区间内只有一个极小点.搜寻区间的确定一般采用外推法,对于电机设计,特别是爪极电机设计这样一个复杂的问题,很难保证在搜索区间内只有一个极小点,因此有可能使寻优结果出现振荡现象,即用 0.618 法求出的最优点比初始点还差,因此严重影响了收敛速度.

当初始点非常接近于函数的一个极小点,而

此点又非常靠近约束边界时,这时就会使寻优结果收敛不到最优值.这时用外推法求得的搜寻区间有可能使函数收敛于次最优值 X' .这是因为初始点已非常接近此方向上的最优值,且此点非常靠近约束边界.因此在求得搜寻区间之后,进入 0.618 法进行一维搜寻之前,加一个判别语句

$$|T_2 - T_3| < \epsilon, |T_2 - T_1| < \epsilon,$$

如上述两个条件有一个成立,则令最优步长等于 T_2 .

5 优化结果

本文采用 powell 共轭方向法对 15 kW ~ 220 kW 6 个规格的爪极式无换向器电机进行了优化设计,结果是令人满意的,有效成本平均下降 13.2 %.

参考文献

- [1] 上山直彦.可控硅电动机的原理及运行[M].杨庚文,龚向阳译.北京:机械工业出版社,1983:100.
- [2] 华中工学院电机教研室.六相 30° 相带绕组的同步发电机[J].华中工学院学报,1974,2(3):19-30.
- [3] 俞鑫昌.电机、电器优化设计[M].北京:机械工业出版社,1988:84-87.

Optimization of Designing Commutatorless Claw - pole Motors

XIN Xiao - nan

(College of Electrical & Information Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In this paper, the designing characteristic property of commutatorless claw - pole motors is studied, and the torque characteristic property is improved by using six phase winding of 30° belt. With the cost of effective material of the claw - pole motors as the objective function, the motors are optimally designed by means of powell method of conjugate and sequential unconstrained minimization technique.

Key words: commutatorless claw - pole motor; powell method of conjugate; sequential unconstrained minimization technique; extrapolating technique