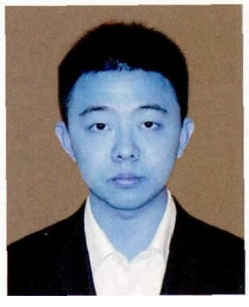
基于电磁转矩约束的永磁无刷直流电动机磁损耗抑制算法

永磁无刷直流电动机的优化设计对磁损耗的稳定性要求较高，需要对磁损耗进行有效抑制，以提高电动机的电压增益和效率。永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制问题是一个多变量约束优化问题，传统的磁损耗抑制方法无法实现全局优化，性能不好。提出了一种基于电磁转矩约束的永磁无刷直流电动机磁损耗抑制算法，构建了电动机磁损耗的优化控制目标函数，将磁偶极子辐射电磁场分为三个区域，得到电动机偶极子的全磁场矢量，通过对电动机的磁滞损耗抑制、涡流损耗抑制和附加涡流损耗抑制构建多元线性方程，采用电磁转矩约束方法实现对电动机的磁损耗抑制。仿真结果表明，采用该算法能有效实现对电动机磁损耗抑制，提高电动机的电压增益和效率等输出性能。

于 喆 王 刚 许傲然 赵 毅/沈阳工程学院电力学院



于 喆/助理工程师

关键词/Keywords
永磁无刷直流电动机·
优化·
电磁损耗·

永磁无刷直流电动机作为一种微电动机，在现代电力系统中具有广泛的应用，它是由一块或多块永磁体建立磁场的直流电动机，具有体积小、效率高、设计简单和稳定性好等优点，广泛应用在导弹、火炮、人造卫星和宇宙飞船等物体的电力驱动及机组供电中。永磁无刷直流电动机主要由电动机主体和驱动器组成，采用恒定励磁电流机理方法进行电动机驱动，通过改变电枢电压实现功率调节和自动控制。永磁无刷直流电动机采用逆变器进行电动机驱动，可靠性和稳定性较好，但在这一驱动实现过程中具有大规模的磁损耗，影响了电动机的寿命，在其优化设计中对磁损耗的稳定性要求较高，需要对磁损耗进行有效抑制，以提高电动机的电压增益和效率。研究永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制方法具有重要的价值和意义[1]。

永磁无刷直流电动机是一种多变量、非线性和强耦合的磁损耗系统，受到外界的不确定干扰因素影响较大，磁损耗的约束变量较多，难以形成一种有效的直流电动机磁损耗抑制方法。传统的永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制方法主要有PID神经元控制抑制模型、基于粒子群优化的磁损耗抑制模型和基于模糊控制的磁损耗抑制模型等，其中基于粒子群优化的磁损耗抑制模型应用较为典型，且取得了一定的研究成果[2]。文献[3]提出一种基于永磁同步电动机抗干扰模糊PID控制的磁损耗抑制算法，采用无阻尼非线性约束方法实现磁损耗抑制，在优化电动机输出功率方面具有较好的性能，但该算法存在非线性失真的缺陷；文献[4]设计了一种基于电磁耦合器间隙磁密信息特征分解的永磁无刷直流电动机磁损耗抑制算法，同时设计了间隙变化不太敏感的电磁耦合器，提高了永磁无刷直流电动机的感应电能传输效益，但该方法对电动机磁损耗的抑制效果并不明显，且无法实现全局优化，性能不好[5-7]。

针对上述问题，提出一种基于电磁转矩约束的永磁无刷直流电动机磁损耗抑制算法。首先设计了永磁无刷直流电动机的优化结构模型；然后分析了约束电动机磁损耗的目标参数，构建了系统的目标函数，采用电磁转矩约束方法实现对电动机的磁损耗抑制，从而达到算法改进的目的；最后进行仿真实验，展示了算法的优越性能。

中国知网 https://www.cnki.net

问题描述及目标函数构建

1. 永磁无刷直流电动机的几何参数模型

永磁无刷直流电动机优化设计的基础是进行电动机的磁损耗抑制，并为构建电动机优化控制目标函数提供数据模型，研究的永磁无刷直流电动机的结构模型如图1所示。

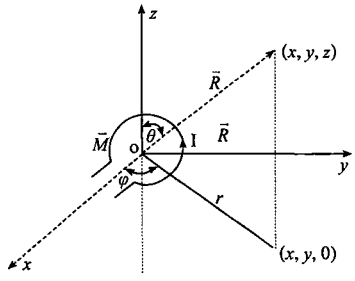


图1　永磁无刷直流电动机的结构模型

以图1为设计原型，进行电动机的几何参数模型构建，给出优化参数模型分别为：电磁耦合极对数I，极弧系数θ，辐射线圈厚度x，转子/定子轭厚度y，线圈厚度z，气隙长度$\vec{M}$，转子半径r，铁心磁导率φ，线圈直径$\vec{R}$，入为磁偶极子的定/转子轴向长度比，$\lambda = d_b / \vec{R}$，其中$d_b = 2(r + \vec{M})$。在实际应用中，永磁无刷直流电动机线圈中的电流随探头发射频率的提高而降低，辐射磁矩可以表示为

$$\boldsymbol{E}_{\phi} = \frac{\omega \boldsymbol{M}}{4\pi R^2}\sin\theta(KR - \mathrm{j})\mathrm{e}^{-\mathrm{j}KR} \tag{1}$$

磁矩在磁偶极子的作用下出现传播衰减[8]，得到永磁无刷直流电动机的辐射场的目标函数为

$$\boldsymbol{H}_R = \frac{2\boldsymbol{M}}{4\pi\mu R^3}\cos\theta(1 + \mathrm{j}KR)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}KR} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{H}_R = \frac{2\boldsymbol{M}}{4\pi\mu R^3}\cos\theta[1 + \mathrm{j}KR + (\mathrm{j}KR)^2]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}KR} \tag{3}$$

在永磁无刷直流电动机机组供电过程中，随着实际电流矢量的变化，电磁耦合模值为

$$\left|H_R\right| = \frac{M}{4\pi\mu R^3}\cos\theta\sqrt{1 + 2\chi + 2\chi^2}\mathrm{e}^{-\chi} \tag{4}$$

永磁无刷直流电动机的定/转子轴向相移为

$$\phi_R = -\chi + \arctan\frac{\chi}{1 + \chi} \tag{5}$$

考虑到漏磁系数k_1，得到电动机传统控制的转矩为

$$\boldsymbol{H}_{\theta} = \frac{\boldsymbol{M}}{4\pi\mu R^3}\sin\theta[1 + \chi + \mathrm{j}\chi(1 + 2\chi)]\mathrm{e}^{-\chi} \tag{6}$$

$$\left|H_{\theta}\right| = \frac{M}{4\pi\mu R^3}\sin\theta\sqrt{1 + 2\chi + 2\chi^2 + 4\chi^3 + 4\chi^4}\mathrm{e}^{-\chi} \tag{7}$$

通过上述模型构建，得到了永磁无刷直流电动机的几何参数模型，为实现电动机的磁损耗抑制提供系统参数基础。

2. 电动机磁损耗优化控制的目标函数

电动机的功率损耗可以分为电损耗、磁损耗和机械损耗三部分，其中磁损耗对电动机的控制输出影响较大，主要包括磁滞损耗、涡流损耗和附加涡流损耗，为了实现电动机的磁损耗抑制，构建电动机磁损耗的优化控制目标函数，将磁偶极子辐射电磁场分为三个区域，得到电动机偶极子的全磁场矢量为

$$\boldsymbol{H} = \sqrt{\boldsymbol{H}_R^2 + \boldsymbol{H}_{\theta}^2} \tag{8}$$

当偶极子的辐射磁矩一定时，磁场值是R与θ的函数，随距离变化的关系如图2所示。

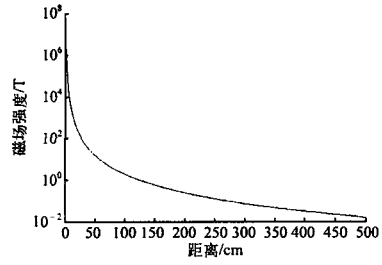


图2　磁场强度随距离变化关系

通过上述设计，得到了电动机磁损耗优化控制的目标函数。分析图2仿真模型可见，磁场强度在角度一定时，与探测距离成三次方关系单调递减。为了提高电能的传输效率，需要使漏磁和漏磁电感达到最小[9-12]，以此为思想构建目标控制函数，计算电枢反应和定/转子铁心磁阻，可以估算为

$$F_{\mathrm{m}} = \frac{B_{\mathrm{r}} l_{\mathrm{m}}}{\mu_0 \mu_{\mathrm{r1}}} \tag{9}$$

$$A_{\mathrm{g}} = l_{\mathrm{s}}\frac{\beta\pi}{p}(r_{\mathrm{r}} + l_{\mathrm{g}}) \tag{10}$$

$$\Re = \frac{1}{\mu_0 l_{\mathrm{s}}\beta\pi/p}\left(\frac{1}{\mu_{\mathrm{r1}}}\int_{r_{\mathrm{r}}-l_{\mathrm{m}}}^{r_{\mathrm{r}}}\frac{d_{\mathrm{r}}}{r} + \int_{r_{\mathrm{r}}}^{r_{\mathrm{r}}+l_{\mathrm{g}}}\frac{d_{\mathrm{r}}}{r} + \frac{1}{\mu_{\mathrm{r2}}}\int_{r_{\mathrm{r}}+l_{\mathrm{g}}}^{r_{\mathrm{r}}+l_{\mathrm{g}}+l_{\mathrm{w}}}\frac{d_{\mathrm{r}}}{r}\right) \tag{11}$$

中国知网 https://www.cnki.net

其中，真空磁导率$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/mH/m，对垂直磁偶极子辐射反射磁场的径向分量进行特征分解，考虑齿槽转矩最小化，假设电动机的永磁体剩余磁密为B_r，定/转子铁心B－H曲线在极值点处的磁密B_{sy}^{knee}需要进行预先控制，考虑到漏磁系数k_1，得到电动机电磁转矩的计算表达为

$$T_{em}=\frac{\pi k_f k_c k_1 k_\beta B_r l_m l_s l_w (2r_r+2l_g+l_w)J_{cu}}{\ln(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m})} \quad (12)$$

$$k_1=1-\frac{1}{0.9\{r_r/[\beta p(l_g+l_w)]\}^2+1} \quad (13)$$

$$k_\beta=\frac{\alpha(\beta,k_c)}{k_c} \quad (14)$$

式中，T_{em}为电动机的电磁转矩；k_1为漏磁系数；k_β为附加涡流损耗；J_{cu}为非正弦磁密。

为了使无刷直流电动机得到最大的电磁转矩，需要进行电动机磁损耗抑制，磁损耗抑制算法改进实现如下所述。

电动机磁损耗抑制算法改进实现

1. 电磁转矩约束模型

永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制问题是一个多变量约束优化问题，传统的磁损耗抑制方法无法实现全局优化，性能不好。为了克服传统方法的缺陷，提出一种基于电磁转矩约束的永磁无刷直流电动机磁损耗抑制算法。构建永磁无刷直流电动机的电磁转矩约束模型，永磁无刷直流电动机是由一块或多块永磁体建立磁场的直流电动机，它是电磁转矩永磁体和绕组磁导率的联合函数，电动机在旋转运动中，存在N个与磁场垂直的导体（见图1），令$l=l_s$，$r=r_r+l_g$，$NI=A_wJ_{cu}k_f$，再计算得到B，得到永磁无刷直流电动机的饱和磁密，即

$$NI=\pi l_w(2r_r+2l_g+l_w)J_{cu}k_fk_c \quad (15)$$

式中，k_c为由控制系统决定的修正系数；在任意时刻t，电动机干扰电场中绕组表面处的磁通密度为B_g；电磁场的总输入net_j等于与其各稳态工作点的线性差分幅频响应；假设ρ_m、ρ_w和ρ_y为永磁体密度、绕组密度和铁心密度，则电动机绕组的自感为

$$L_s=\frac{\pi\mu_0k_f^2A_w^2l_s}{72A_c^2p^2\ln(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m})} \quad (16)$$

通过上述分析可见，永磁电动机的气隙磁密和永磁体磁密相等，可以将电动机转速和损耗关联起来，通过电磁转矩约束控制实现对电动机的磁损耗抑制。

2. 电动机的磁损耗抑制优化实现

电动机的磁损耗抑制主要包括磁滞损耗抑制、涡流损耗抑制和附加涡流损耗抑制，磁损耗抑制目标的优化是一个多元线性过程，在上述参数几何模型和电磁转矩约束模型设计的基础上，构建优化目标函数，得到电磁转矩表示为

$$T_{em}=\frac{\pi k_f k_c k_1 k_\beta B_r l_m l_s l_w (2r_r+2l_g+l_w)J_{cu}}{\ln(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m})}-(\frac{P_e+P_h}{\omega_r}) \quad (17)$$

输出转矩为

$$T_{out}=T_{em}-(P_w+P_b)/\omega_r \quad (18)$$

为了使磁损耗最小，采用转矩约束方法，将优化变量表示为矢量$\boldsymbol{X}$，得到优化目标函数为

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} p & \beta & l_m & l_y & l_w & l_g & r_r & \lambda & A_c \end{pmatrix}^T \quad (19)$$

在目标函数中使用权重系数，以控制电动机的输出功率和电能传输效率，得到电磁转矩约束下的电动机磁损耗抑制后的输出功率为

$$P_1=P_{cu}+P_h+P_e+P_b+P_w \quad (20)$$

式中，P_{cu}为电损耗；P_h为机械损耗；P_b为磁损耗之和，假设$P=\mu_2/\mu_1$，得到最后的优化输出系数为

$$\begin{cases} a_1=\sqrt{\sqrt{\frac{\lambda^2}{4}+\alpha_1^4}+\frac{\lambda^2}{2}};b_1=\sqrt{\sqrt{\frac{\lambda^2}{4}+\alpha_1^4}-\frac{\lambda^2}{2}} \\ a_2=\sqrt{\sqrt{\frac{\lambda^2}{4}+\alpha_2^4}+\frac{\lambda^2}{2}};b_2=\sqrt{\sqrt{\frac{\lambda^2}{4}+\alpha_2^4}-\frac{\lambda^2}{2}} \end{cases} \quad (21)$$

通过上述设计，实现了永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制。

仿真实验与性能分析

检验改进后的算法在进行永磁无刷直流电动

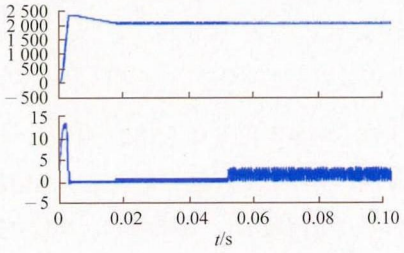
中国知网 https://www.cnki.net

机电磁损耗抑制时，可以通过提高电动机的电压增益和效率等方面的性能来实施仿真实验。在实验中，针对相同外形尺寸60 mm×60 mm设置三部永磁无刷直流电动机，使其额定电压与额定转矩分别为50 V与156 N·m，参数设置使其$l=\vec{R}$，$r=r+\vec{M}$，并使磁密在1.5～2.5之间取值，定子结构为不同的2级、3级永磁无刷直流电动机。三部高速永磁无刷直流电动机的设置参数如下表所示。

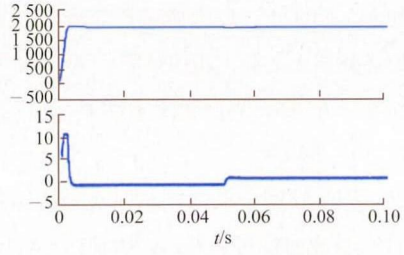
表　永磁无刷直流电动机参数

参数	2p－3s non	2p－6s over	2p－6s non
额定电压/V	50	50	50
额定功率/kW	3.6	3.6	3.6
额定转速/(r/min)	170 000	170 000	170 000
额定转矩/N·m	156	156	156
定子铁心长度/mm	49.3	40.5	44
定子内（半）径/mm	17	17	17
永磁体外（半）径/mm	12	12	12
永磁体的相对磁导率/μm	1.07	1.07	1.07
永磁体剩磁/T	0.95	0.95	0.95

在上表描述的仿真环境下进行参数设置，通过电磁转矩约束算法与传统算法的对比，可以得出三部永磁无刷直流电动机的平均转速、平均转矩等参数的仿真波形，如图3所示。



(a) 传统算法下的永磁无刷直流电动机波形



(b) 改进算法下的永磁无刷直流电动机波形

图3　永磁无刷直流电动机的波形

从图3可见，使用改进算法进行永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制设计时，可以有效地模拟永磁无刷直流电动机的运行状态，提高了其准确性和效率，为优化电动机的电能传输效率奠定了基础，最后为了定量分析和对比算法性能，使用改进算法进行电动机的磁损耗抑制，以电动机在不同偏芯偏移、轴向偏移和负载电阻下的电流增益、输出电压增益、功率因数和电动机效率为测试指标，得到仿真结果如图4所示。

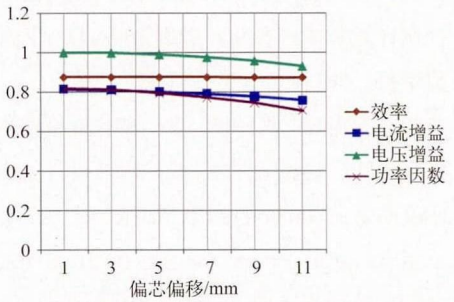


图4　永磁无刷直流电动机的性能优化分析

从图4可见，使用改进算法进行永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制后，电动机对轴向偏移及偏芯下的输出参数稳定性较好，而电动机的效率在90%左右，电压增益较为稳定，输出的功率有所提高，展示出电磁转矩约束算法在提高电动机的电压增益和效率方面的优越性能。

结束语

永磁无刷直流电动机是一种多变量、非线性和强耦合的磁损耗系统，受到外界的不确定干扰因素影响较大，磁损耗的约束变量较多，永磁无刷直流电动机的磁损耗主要包括磁滞损耗、涡流损耗和附加涡流损耗，为提高电动机的电压增益和效率，需要进行磁损耗抑制，提出一种基于电磁转矩约束的永磁无刷直流电动机的磁损耗抑制算法。设计了永磁无刷直流电动机的优化结构模型，分析了约束电动机磁损耗的目标参数，构建了系统的目标函数，采用电磁转矩约束方法实现对电动机的磁损耗抑制。实验结果表明，采用改进后的算法能有效地模拟永磁刷直流电动机磁场分布特征，提高了电动机几何参数计算的准确性，同时提高了电动机的电压增益和效率方面的优越性能。

中国知网　https://www.cnki.net

参考文献

[1] 雷邦军，费树岷，翟军勇．静止无功补偿器(SVC)的一种新型非线鲁棒自适应控制设计方法[J]．中国电机工程学报，2013，33(30)：65-70.

[2] 张小冰．变频器优化控制方法研究与仿真[J]．计算机仿真，2011，28(11)：409-412.

[3] 方支剑，段善旭，陈天锦，等．储能逆变器预测控制误差形成机理及其抑制策略[J]．中国电机工程学报，2013，33(30)：1-8.

[4] 齐昕，周晓敏，马祥华，等．感应电机预测控制改进算法[J]．电机与控制学报，2013，17(3)：62-69.

[5] Uler G F，Mohammed O A，Koh C S．Utilizing genetic algorithms for the optimal design of electromagnetic devices [J]．IEEE Transactions on Magnetics，1994，30(6)：4296-4298.

[6] Messine F，Nogarede B，Lagouanelle J L．Optimal design of electromechanical actuators：a new method based on global optimization [J]．IEEE Transactions on Magnetics，1998，34(1)：299-308.

[7] Markovic M，Ragot P，Perriard Y．Design optimization of a BLDC motor：a comparative analysis，in：Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference [C]．Turkey，2007：1520-1523.

[8] Bianchi N，Bolognani S．Brushless motor design：an optimization procedure based on genetic algorithms，in：Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Drives [C]．UK，1997：16-20.

[9] Hwang C C，Chang J J．Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor [J]．Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2000，20(9)：234-236.

[10] Markovic M，Perriard Y．Simplified design methodology for a slotless brushless DC motor [J]．IEEE Transactions on Magnetics，2006，42(12)：3842-3846.

[11] 陈国培，艾武，张静波，等．基于FPGA的ARM与绝对式编码器的通信接口实现[J]．微电机，2012，45(8)：28-31.

[12] 连军强，谢顺依，王鼎．基于有限元的永磁无刷直流电机转矩优化设计[J]．电机与控制应用，2011，38(12)：7-12.

(收稿日期：2015－04－06) EA

(上接第98页)

结束语

中央空调系统采用变频控制不仅能够节能环保，而且是大势所趋。本文重点介绍了中央空调系统的组成以及变频节能的原理，对中央空调系统的制冷机组、水循环系统以及风机营盘系统的变频控制进行了详细分析，给出了相应的节能策略。通过对冷冻水循环系统的变频控制仿真实验，证明了基于PID控制器的变频控制可以取得良好的跟踪效果。展望未来，采用变频技术的中央空调系统必将在经济效益和社会效益两方面取得双赢。

参考文献

[1] 刘磅，李信洪．中央空调系统优化与节能整体解决方案[J]．机电工程技术，2012，41(2)：53-58.

[2] 肖丽萍，唐军，李泽滔．中央空调变频调速节能控制的几个问题[J]．贵州科学，2012，30(2)：72-75.

[3] 刘旭东，叶明哲．变频调速在空调中的应用[J]．中国高新技术企业，2010(18)：30-33.

[4] 邹玉东．中央空调节能技术研究[J]．科技风，2010(9)：93-94.

[5] 潘多．PLC控制中央空调水泵变频调速系统的设计[J]．农业科技与装备，2010(2)：37-39.

[6] 陈剑萍，王坚敏，钟晓波，等．变频节能技术在中央空调中的应用[J]．轻工机械，2009，27(2)：101-103.

(收稿日期：2015－03－19) EA

中国知网 https://www.cnki.net