

电动汽车用开关磁阻电动机控制角度优化的研究

基于50 kW的开关磁阻电动机在电动汽车制动过程中能量回收最大化原则,通过Ansoft软件后处理功能,对参数开通角和关断角采用网格法进行优化,依据开通角和关断角与功率和能量回收率的对应变化曲线,得到对应不同转速下的最优开通角和关断角。这为电动汽车用开关磁阻电动机的控制策略提供了充足的理论依据。

张 丽 李彦哲/兰州交通大学自动化与电气工程学院



张 丽/硕士研究生

汽车能量再生制动系统是指在车辆制动过程中将车辆行驶的动能转化为其他形式能量储存起来,在车辆起动或者加速时再次加以利用的系统,该系统提高了汽车能量综合利用率^[1, 2]。作为系统能量转换装置,实现制动能量回收最关键部件之一的是制动电动机。开关磁阻电动机因其具有结构坚固、损耗低、有较高的允许温升且适用于高速运转和极端恶劣的工作环境等特点,被认为是电动汽车及混合动力汽车中的一种最具潜力的驱动方式之一^[3],目前日本逐渐开始采用开关磁阻电动机代替Toyota Prius 2003中使用的永磁同步电动机,相同尺寸下,开关磁阻电动机可以得到更高的转矩密度和效率^[4]。

关键词/Keywords

开关磁阻电动机·
有限元分析·
角度位置控制·

由于开关磁阻电动机的双凸极结构特点,造成磁路非线性化,使定子绕组电流和磁通波形极不规则。为了更为准确地研究制动能量回收效率,本文选择有限元分析法对开关磁阻电动机进行非线性化建模,并且基于电动汽车制动过

国家留学人员科技活动择优资助项目(25200604)。

程中能量回收最大化原则,对再生制动运行机理进行研究,分析在回馈制动过程中开通角和关断角与输出功率和能量回收率之间的影响。

SRG回馈制动原理

开关磁阻电动机控制参数相对较多,控制方法非常灵活,其中实际控制变量包括开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 、励磁电压 u 及相绕组电流 i 等。本文选用12/8极开关磁阻电动机为例,对制动回馈时的线性电感模型进行定性分析。

与电动状态类似,其回馈制动控制模式可分为角度位置控制(APC)、脉宽调制控制(PWM)和电流斩波控制(CCC)。虽然这三种控制方式控制变量不同,但都调节励磁电流 i_p ,最终实现对转矩的控制^[5, 6]。

开关磁阻电动机各相绕组由开关电路控制工作,图1为开关磁阻电动机工作在回馈制动时的电流波形。主开关在 $\theta = \theta_{on}$ 时刻功率开关器件导通,在 $\theta = \theta_{off}$ 时刻功

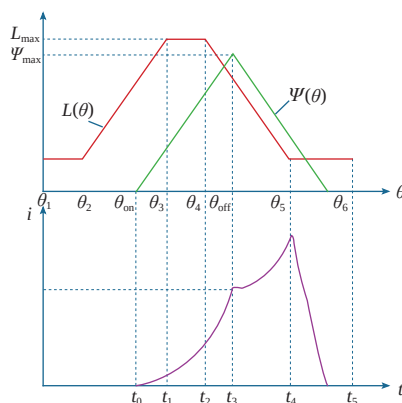


图1 回馈制动相电流与转子位置对应

率开关器件关断。即在 $\theta_{\text{on}} \sim \theta_{\text{off}}$ 阶段为励磁阶段，在 $\theta_{\text{off}} \sim \theta_1$ 阶段为回馈发电阶段，其中 $\theta_1 \sim \theta_6$ 为相电流通电工作周期角度，即 $2\pi/N_r = 45^\circ$ 。

假设电动机磁路不饱和，相绕组电感 $L(\theta)$ 为理想电感^[7]，与相绕组电流无关。由图1可以得到线性电感解析式为

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ K(\theta - \theta_1) + L_{\min} & \theta_2 \leq \theta \leq \theta_3 \\ L_{\max} & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \\ L_{\max} - K(\theta - \theta_4) & \theta_4 \leq \theta \leq \theta_5 \\ L_{\min} & \theta_5 \leq \theta \leq \theta_6 \end{cases} \quad (1)$$

式中， $K = (L_{\max} - L_{\min})/(\theta_3 - \theta_2) = (L_{\max} - L_{\min})/\beta_s(\beta_s$ 为定子磁极极弧)。在发电模式下，相电压平衡方程式为

$$\pm u = R_w i + \frac{d\Psi(\theta, i)}{dt} \quad (2)$$

式中， $+u$ 为励磁阶段相绕组端电压； $-u$ 为发电阶段相绕组端电压； R_w 为相绕组电阻； Ψ 为该相磁链，其函数表达式为 $\Psi = L(\theta)i$ 。由于相绕组端电压极小，其影响可忽略不计，假设开关磁阻电动机由直流恒定电源 U_s 供电，则由式(2)可得

$$L(\theta) \frac{di}{d\theta} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} = \pm \frac{U_s}{\omega} \quad (3)$$

相绕组通电瞬间 $i(\theta_{\text{on}}) = 0$ ，将此作为式(3)第一阶段求解后的初始条件，之后四个阶段均以上阶段解析结果值作为本次初始条件，即 $i(\theta_3)$ 、 $i(\theta_4)$ 、 $i(\theta_{\text{off}})$ 和 $i(\theta_5)$ ，依次计算电感每段对应的电流值，结合式(1)推导得到SRM回馈制动时的电流函数解析式为

$$i(\theta) = \begin{cases} \frac{U_s}{\omega} \frac{(\theta - \theta_{\text{on}})}{K(\theta - \theta_2) + L_{\min}} & \theta_{\text{on}} \leq \theta \leq \theta_3 \\ \frac{U_s}{\omega} \frac{(\theta - \theta_{\text{on}})}{L_{\max}} & \theta_3 \leq \theta \leq \theta_4 \\ \frac{U_s}{\omega} \frac{(\theta - \theta_{\text{on}})}{L_{\max} - K(\theta - \theta_4)} & \theta_4 \leq \theta \leq \theta_{\text{off}} \\ \frac{U_s}{\omega} \frac{(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{L_{\max} - K(\theta - \theta_4)} & \theta_{\text{off}} \leq \theta \leq \theta_5 \\ \frac{U_s}{\omega} \frac{(2\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta)}{L_{\min}} & \theta_5 \leq \theta \leq \theta_6 \end{cases} \quad (4)$$

图2为式(4)的验证波形，证明本回馈制动电流的推导完全正确。

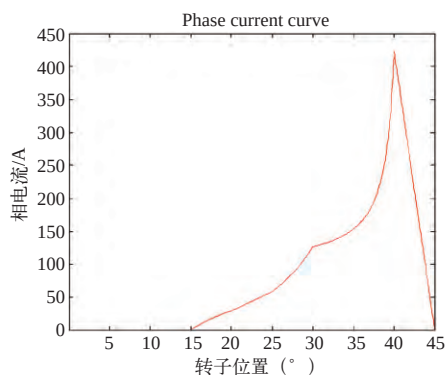


图2 $U_s = 500 \text{ V}$ 、 $n = 1200 \text{ r/min}$ 、 $\theta_{\text{on}} = 15^\circ$ 、 $\theta_{\text{off}} = 30^\circ$ 相电流验证波形

电磁转矩由磁阻最小趋势产生，由于磁路的非线性通常由磁场储能来计算，表达式为

$$T_{\text{em}}(\theta, i) = - \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} \Big|_{\Psi = c} \quad (5)$$

式中， W 为相电流建立起来的磁储能；磁链 $\Psi = c$ 为计算的约束条件。由磁储能表达式和磁链表达式得到

$$W = \int_0^{\Psi} i d\Psi = \frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \quad (6)$$

忽略磁饱和及边缘效应，对式(5)做线性化处理可得

$$T_{\text{em}}(\theta, i) = - \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (7)$$

由式(7)可知，若在 $dL/d\theta < 0$ 区间内给相绕组通电，则产生的电磁转矩为负，即开关磁阻电动机处于工作发电模式。

综上，结合图1与式(4)可知， $t_0 \sim t_3$ 为励磁阶段，相绕组通电瞬间由于 $L(\theta_{\text{on}})$ 的值较大，相电流上升速度较慢，电动机从励磁回路吸收电能转化为相绕组储能，并伴有机械能的输出与输入； $t_3 \sim t_5$ 为发电阶段，此时功率开关器件断开，电动机通过续流二极管向负载回路输送能量。若转速较高，电流继续上升；转速较低，电流开始下降，此阶段将机械能和磁场储能转换为电能输出。对于结构一定的开关磁阻电动机，固定外加电压，绕组电流将受到开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 以及转速的影响，同时输出的电磁转矩和输出功率也

将会随电流的变化而变化,因此有必要研究开通角 θ_{on} 和关断角 θ_{off} 对SRG发电性能的影响。

SRG的有限元非线性建模

本文利用Ansoft软件对12/8极开关磁阻电动机进行有限元分析^[8],样机参数如表1所示,对给定的定子外径和铁心长度利用传统方法演算出电动机内部其他尺寸,并且对关键几何尺寸进行了优化^[9-11],在保证尺寸不变的前提下,提高电动机效率和输出功率。然后利用Ansoft/RMxpert软件生成开关磁阻电动机的几何模型,得到相绕组的磁特性曲线 $\psi-i$,如图3所示。将定子凸极中心与转子凹槽中心重合的位置定义为非对齐位置,此时相电感值最小,转子角为 0° ;将定子凸极中心与转子凸极中心重合的位置定义为对齐位置,此时电感值最大,转子角为 22.5° 。

表1 12/8极SRG样机参数

	极数 /个	外径 /mm	内径 /mm	极弧 ($^\circ$)	轭高 /mm	铁心长度 /mm
定子	12	269	154	15	13	156
转子	8	153	71	16	16	156

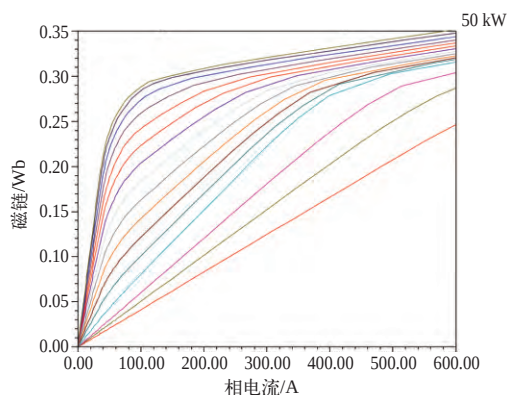
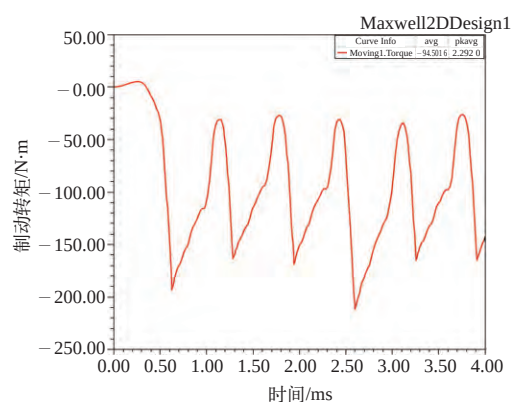
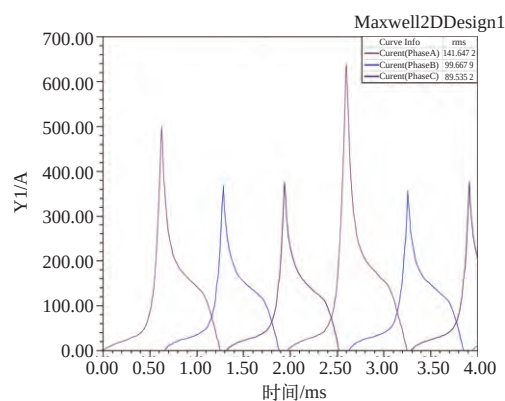


图3 磁链特性曲线

利用Ansoft/Maxwell 2D将RMxpert建立好的模型导入,并对其瞬态场进行求解。依次对模型进行材料属性编辑,建立边界条件和励磁源,设置求解选项剖分网格,求解后得到开通角为 15° 、关断角为 30° 及额定转速 $n=4\,000\text{ r/min}$ 时的转矩和电流波形,利用Ansoft软件后处理功能可以直接计算得到制动过程转矩的脉动值、平均值以及电流的有效值,如图4所示。



(a) 制动转矩曲线



(b) 相电流曲线

图4 制动转矩曲线和相电流曲线

SRG回馈制动角度优化分析

基于上述模型,本文主要研究SRM基速以上的恒功率区,选定额定转速 $n=4\,000\text{ r/min}$,励磁电压 $u=500\text{ V}$,在Ansoft软件的瞬态求解器下,以开通角和关断角为变量进行效率分析^[11]。由文献[12]可知,当SRM回馈制动时,每相一周期的工作输出的总电能等于闭合磁链轨迹所包围的面积,充分利用Ansoft软件强大的后处理功能,可实现对电动机回馈能量快速准确的分析和研究。

1. 基于输出功率最大的开通关断角度优化研究

因开关磁阻在电动机中的一个相电流周期内,回收的有效能量 W_{elec} 为闭合磁链轨迹所包围的面积,故在Maxwell的求解结果 $\psi-i$ 图中,对轨迹添加积分函数,得到的值便是SRM发出的有效能量 W_{elec} 。

图5为固定关断角 29° ,开通角选取 $13^\circ\sim 20^\circ$ 、步长 1° ,转速 $3\,500\sim 6\,500\text{ r/min}$ 、步长 500 r/min

时, 功率随开通角变化的曲线。从图中可以看出: 同一转速下, 输出功率随开通角的增加而基本上呈线性减小, 若保持开通角、关断角相同, 则输出功率随着转速的上升而减小。这主要是因为开通角增加, 绕组励磁时间变短, 发电电流随开通角的增大而变小, 故输出功率逐渐减小; 然而随着转速的升高, 如式(4)所示, 绕组的发电电流逐渐减小, 也造成了输出功率下降。

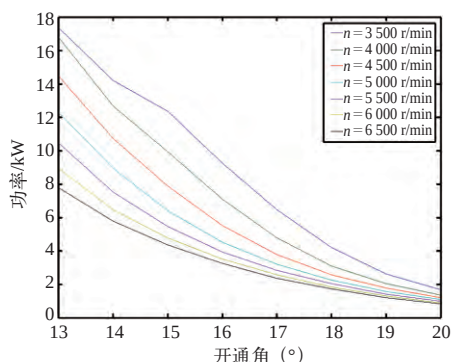


图5 输出功率随转速和开通角的变化曲线

图6为固定开通角 15° , 关断角选取 $24^\circ \sim 33^\circ$ 、步长 1° , 转速 $3\,500 \sim 6\,500$ r/min、步长 500 r/min时, 功率随关断角变化的曲线。从图中可以看出: 同一转速下, 输出功率随关断角的增加而不断变大, 若保持开通角、关断角相同, 则输出功率随着转速的上升而减小。这主要是因为关断角增加, 绕组励磁时间变长, 励磁电流也迅速增加, 导致发电电流有效区域增加, 同时促使输出功率逐渐变大, 随着转速的升高, 输出功率下降原因同开通角中的分析。

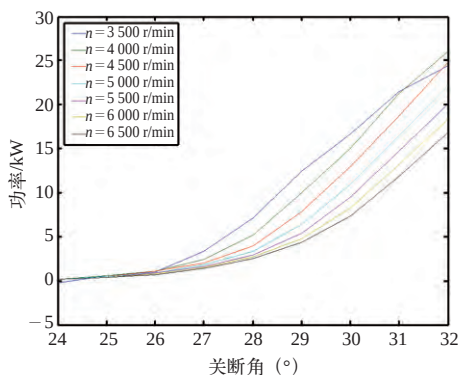


图6 输出功率随转速和关断角的变化曲线

2. 基于能量回收率最大开通关断角度优化研究

对上一节中SRM回馈的有效能量 W_{elec} 求导, 得到有效输出发电功率 $dW_{elec}/dt = P_{out}$, 而电源输入功率 P_{in} 等于A相励磁阶段的绕组端电压与绕组端电流乘积的平均值, 故在回馈制动过程中, 一个相电流周期内的能量回收率 $\eta_{breaking} = P_{out}/P_{in}$ 。

图7为能量回收率与开通角关系曲线, 可见, 虽然开通角和关断角相同时, 高速回收的能量低于低速回收的能量, 但由于高速需要的输入能量相对较少, 故其能量回收率较高, 在转速为 $5\,500$ r/min、 $\theta_{on} = 13^\circ$ 及 $\theta_{off} = 29^\circ$ 时, 其回收的能量可高达70%。

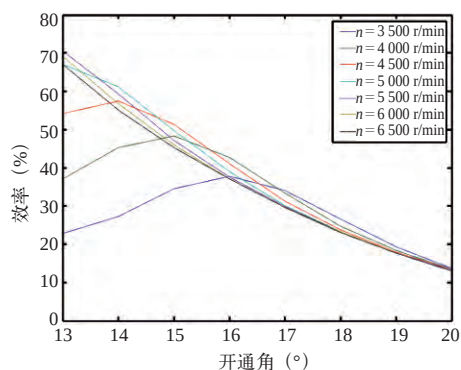


图7 输出功率随转速和开通角的变化曲线

图8为能量回收率与关断角关系曲线, 从图中可以看出, 同一转速下, 随着关断角的不断增加, 能量回收率有所增加, 但当增大到一定限值时, 能量回收率将减小, 即在每一个转速下, 均有一个最优关断角使回收能量率最高。这表明汽车在高速制动时, 更容易获得高效的能量回收率。

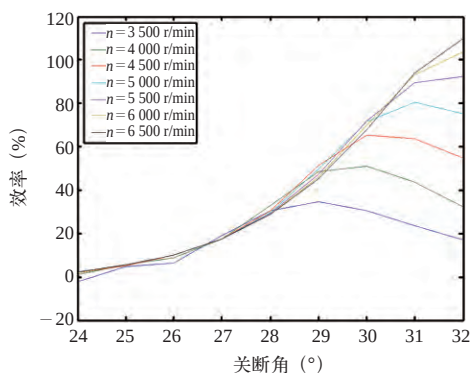


图8 输出功率随转速和关断角的变化曲线

结束语

开关磁阻电动机在回馈制动模式下, 调节 θ_{on} 和 θ_{off} 对输出功率均有较大影响, 通过实验分析得知, 在保证输出功率最大和能量回收率最高的原则下, 得到的优化后角度如表2所示, 可见, 高转速时需要提前开通, 延迟关断控制, 用以弥补高转速带来的有效发电电流值低的问题, 进而提高输出功率和能量回收率, 为SRM的控制策略研究提供了理论依据。

表2 发电最优的开通角和关断角优化结果

转速/ (r/min)	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000	6 500
开通角 (°)	16	15	14	13	13	13	13
关断角 (°)	28	30	30	31	31	31	31

参考文献

- [1] 何仁. 汽车制动能量再生方法的探讨 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005 (6): 1-4.
- [2] 何仁, 孙龙林, 吴明. 汽车新型储能动力传动系统节能机理 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002 (3): 67-71.
- [3] Rahman K M, Fahimi B, Suresh G, et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36 (1): 111-121.
- [4] Takeno M, Chiba A, Hoshi N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles

- [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (4): 1327-1334.
- [5] 曹志亮, 朱学忠, 刘迪吉. 开关磁阻电动机再生制动分析与应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001 (1): 60-63.
- [6] 刘迪吉, 曲民兴, 朱学忠, 等. 开关磁阻发电机 [J]. 南京航空航天大学学报, 2003 (2): 109-115.
- [7] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 赵博, 张洪亮, 等. Ansoft 12在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] Rafajdus P, Peniak A, Peter D, et al. Optimization of switched reluctance motor design procedure for electrical vehicles [C]. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 397-404.
- [10] Takeno M, Chiba A, Hoshi N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (4): 1327-1334.
- [11] 宋受俊, 刘虎成. 开关磁阻电动机几何尺寸敏感性分析及优化研究 [J]. 微特电机, 2012 (12): 32-34, 45.
- [12] 宋受俊, 刘卫国. 基于磁链轨迹的开关磁阻电机能量效率仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2008 (21): 5970-5975, 5998.

(收稿日期: 2014-08-08) EA

(上接第61页)

作为继电保护专业人员, 应该从事故中总结经验教训, 根据主设备及其附件的实际性能改进保护配置, 以便更好地保护主设备。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2001: 445.
- [2] 李德佳. 国产大型发电机-变压器组及辅助

- 变保护的调试和运行 [J]. 继电器, 2005, 33 (20): 28-32.
- [3] 涂育中. 沙角C电厂发电机出口断路器非全相保护研究 [J]. 广东电力, 2005, 18 (8): 56-61.
- [4] 王建成, 郑砚国, 刘明章, 等. 秦山第二核电厂非全相保护起动失灵动作原因的分析及解决措施 [J]. 继电器, 2006, 34 (4): 83-85.

(收稿日期: 2014-09-15) EA