

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.03.010

开关磁阻发电机角度位置控制自适应遗传优化方法

雷晓犇 王传奇 李雪丰 戴 聪

(空军工程大学航空工程学院,西安,710038)

摘要:以开关磁阻发电机输出电压为研究对象,在分析高速情况下角度位置控制的特点和影响输出电压脉动因素的基础上,提出了基于自适应遗传算法的角度控制策略。当转速或负载变化时,自适应算法控制关断角不变,调节导通角快速稳压,采用遗传算法准确优化开通角与关断角的组合,减小输出电压脉动。通过仿真和实验验证,与单一自适应控制或遗传算法角度控制相比,自适应遗传角度控制策略能够更快速准确优化输出电压。

关键词:开关磁阻发电机;自适应控制;遗传算法;角度位置控制

中图分类号:TM352 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)03-0355-07

Angle Position Control of Switched Reluctance Generator Based on Adaptive Genetic Algorithm

LEI Xiaoben, WANG Chuanqi, LI Xuefeng, DAI Cong

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: Considering the output voltage of switched reluctance generator, an angle control strategy using adaptive genetic algorithm is proposed based on the analysis on the characteristics of angle control and the influencing factors of output voltage ripple under high speed condition. When the speed or load changes, turn-off angle remains unchanged, and conduction angle is adjusted through adaptive algorithm to stabilize the voltage quickly. The genetic algorithm is applied to optimize the combination of opening angle and turn-off angle for the purpose of reducing the voltage ripple. Simulation and experimental results show that compared with single adaptive control or genetic algorithm angle control, the proposed strategy can optimize the output voltage quickly and accurately.

Key words: switched reluctance generator (SRG); adaptive control; genetic algorithm; angle position control

开关磁阻发电机(Switched reluctance generator, SRG)通过磁阻最小原理运行,与其他电机相比,具有结构简单、成本低和容错度高等优点,可控参数较多,在航空航天、风力发电和电动汽车等领域有广阔的应用前景^[1-4]。开关磁阻发电机成为当今发展迅速的多电飞机(More electric aircraft, MEA)、全电飞机(All electric aircraft, AEA)中

(如 F-35)电源系统的首选对象^[5]。开关磁阻发电机输出电压的品质直接影响到电机性能,特别是在航空上,电机转速和负载变化对输出电压有一定影响,因此研究开关磁阻发电机输出电压优化问题有重要的现实意义。

开关磁阻发电机在不同电机转速下控制策略是不同的,在高速时,一般采用角度位置控制(Angle

基金项目:国家自然科学基金(61074007)资助项目;陕西省自然科学基金(2012JM8016)资助项目。

收稿日期:2017-09-19; **修订日期:**2018-04-19

通信作者:雷晓犇,男,副教授,硕士生导师, E-mail:1176058172@qq.com。

引用格式:雷晓犇,王传奇,李雪丰,等. 开关磁阻发电机角度位置控制自适应遗传优化方法[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(3):355-361. LEI Xiaoben, WANG Chuanqi, LI Xuefeng, et al. Angle position control of switched reluctance generator based on adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018,50(3):355-361.

gle position control, APC), 可控参数有开通角和关断角。研究人员对 APC 控制方法进行了大量的研究。文献[6]提出了高速时采用固定关断角, 比例积分(Proportion integration, PI)控制优化开通角的角度控制方式, 但比例积分微分(Proportion integration differentiation, PID)控制无法改善外界干扰对输出的影响。在文献[7~8]中, 制定目标函数和约束条件, 并使用粒子群优化和遗传算法技术确定最佳的开启和关闭角度。文献[9~10]采用神经网络的方法对开关磁阻电机的开通角、关断角进行优化, 但计算复杂、时间较长。文献[11]提出了一种模糊励磁控制器来减少开关磁阻电机的噪声和转矩脉动, 该控制器的设计简单, 可以根据转矩误差的速度产生适当的开启和关闭角度, 以改善转矩响应。文献[12]提出了一种自适应开关磁阻电机智能控制器, 通过模糊逻辑控制器来控制关断角度, 利用自适应神经网络改进模糊推理。文献[13]为了使开关磁阻电机在不同的负载条件下保持电机的速度不变, 导通和关断角度能自适应变化, 提出了一种用于开关磁阻电机开关参数自整定的新算法。

本文针对开关磁阻发电机在高转速情况下的输出电压优化问题, 在开关磁阻发电机的基本工作原理基础上, 分析高转速情况下采用角度位置控制合理性和自激情况下影响输出电压脉动的因素, 提出了基于自适应遗传角度控制算法优化因转速和负载变化引起的输出电压波动问题。

1 基本原理

对于 SRG, 其第 k 相电压平衡方程为

$$U = \begin{cases} i_k R_s + \frac{d\psi_k(i_k, \theta)}{dt} & \theta_{on} < \theta < \theta_{off} \\ -i_k R_s - \frac{d\psi_k(i_k, \theta)}{dt} & \theta_{off} < \theta < 2\theta_{off} - \theta_{on} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U 为输出电压; i_k 为相电流; R_s 为 k 相电阻; $\psi_k(i_k, \theta)$ 为 k 相磁链; θ_{on} 为开通角; θ_{off} 为关断角。由于磁链可以表示为

$$\psi_k(i_k, \theta) = L \times i_k \quad (2)$$

因此, 在励磁阶段

$$U = L \frac{di_k}{d\theta} \omega + \frac{dL}{d\theta} i_k \omega \quad (3)$$

式中忽略绕组电阻, ω 为发电机角速度。

在续流发电阶段

$$U = -L \frac{di_k}{d\theta} \omega - \frac{dL}{d\theta} i_k \omega \quad (4)$$

如图 1 所示, 在一个周期内, $\theta_{on} \sim \theta_{off}$ 为励磁阶段, 开关磁阻发电机进行储能, 将机械能转化为

磁能。由式(3)可知, 当 $dL/d\theta \geq 0$ 时, 由于励磁电压的作用, 电流上升, 电流变化率为正值, 当电机转过电感最高点, 即电感 $dL/d\theta \leq 0$ 时, 电流变化率增大, 电流上升速度加快。 $\theta_{off} \sim 2\theta_{off} - \theta_{on}$ 为续流发电阶段, 开关磁阻发电机开始放电, 将磁能转化为电能, 由式(4)可知, 当关断角时刻的电流 i_1 较大时, 电流变化率为正值, 电流继续升高, 如果 i_1 较小, 电流变化率为负值, 电流会下降。在电感 $dL/d\theta \approx 0$ 时, 电流会快速下降到 0。因此 i_1 的大小决定了开关磁阻发电机发电的效果, 而励磁阶段会影响 i_1 的大小。

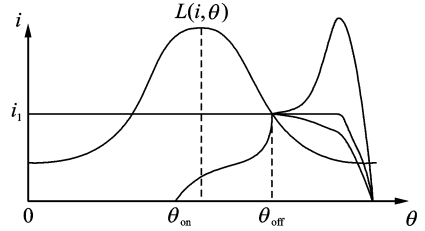


图 1 单周期相电流波形

Fig. 1 Single-phase current waveform

根据开关磁阻发电机的工作原理, 控制方式有 APC、电流斩波控制方式(Current chopping control, CCC)和脉宽调制方式(Pulse width modulation, PWM)。当电机运行速度较高时, 根据文献[14]可知, 应采用 APC。由于文献[14]中针对的是开关磁阻电动机, 而发电机的工作情况有所不同, 因此本文推导了开关磁阻发电机电流斩波控制和角度位置控制分界转速。

式(1)忽略了绕组电阻, 对励磁阶段方程进行变形, 则

$$U = \frac{d\psi_k(i_k, \theta)}{d\theta} \omega \quad (5)$$

对式(5)两边积分有

$$\frac{U(\theta - \theta_{on})}{\omega} = \psi_k(i_k, \theta) - \psi_k(i_k, \theta_{on}) \quad (6)$$

将式(2)代入式(6), 并且在开通角时刻, 电流值为 0, 因此 $\psi_k(i_k, \theta_{on}) = 0$, 所以有

$$i_k = \frac{U(\theta - \theta_{on})}{\omega L} \quad (7)$$

与电动机不同的是, 式(7)中电感是一个随角度变化的量, 但变化范围有限。因此可以设电感为定值, 在励磁阶段, 开关磁阻发电机最大电流为 i_{max} , 电流斩波控制的最高转速 ω_{max} 为

$$\omega_{max} = \frac{U(\theta - \theta_{on})}{i_{max} L} \quad (8)$$

由于饱和导致电流幅值增大, 且随着速度的增高, 电流极值点前移^[14], 所以电流斩波控制和角度位置控制分界转速要比式(8)中的 ω_{max} 小。

2 SRG 电压脉动分析

开关磁阻发电机在应用于航空器时,航空器要求机载设备体积小、质量轻,同时能够完成设备的功能,励磁方式中的他励方式需要外部电源励磁,而自励方式无需外加设备且发电效率满足要求,效率高,因此本文选择自励方式。假设负载为阻性负载,为具体分析影响输出电压的因素,在文献[15]的基础上,本文根据基尔霍夫电流定律,推导输出电压方程。图2为励磁阶段和续流发电阶段的电路图,其中 C 为电容, R 为阻性负载。

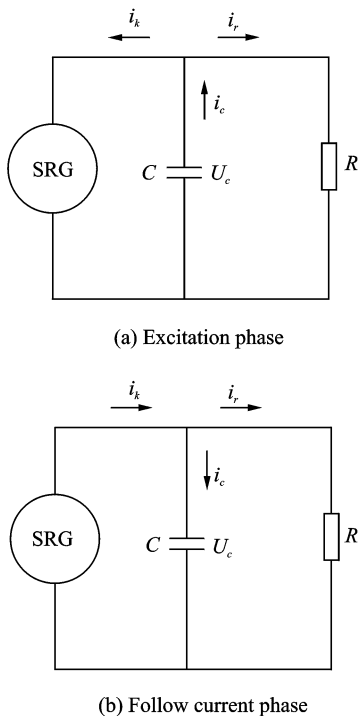


图2 SRG 发电工作过程电路图

Fig. 2 Circuit diagram of SRG generation process

在励磁阶段,有

$$C \frac{dU}{dt} = -i_k - i_r \quad (9)$$

在续流发电阶段,有

$$C \frac{dU}{dt} = i_k - i_r \quad (10)$$

对式(9,10)进行常系数一阶非奇次线性微分方程求解有

励磁阶段

$$U = (Ri_k + f) e^{-\frac{1}{RC\omega}(\theta - \theta_{on})} - Ri_k \quad (11)$$

续流发电阶段

$$U = (-Ri_k + f) e^{-\frac{1}{RC\omega}(\theta - \theta_{off})} + Ri_k \quad (12)$$

式中 f 为常数。

可以看出影响输出电压的参数有转速、负载、电容、开通角和关断角。在开关磁阻发电机高速运

行工作过程中电容为定值,开通角和关断角为控制量,负载和转速会因实际的工况发生变化,特别是在复杂恶劣的航空环境条件下会发生突变,这样必然引起电压脉动,影响电压品质及电机发电性能。

为消除转速和负载变化对电机输出电压脉动的影响,根据式(11,12),当转速上升时,发电机励磁时间变短,储能时间不足导致电压下降,可以控制导通角度增大,保证输出电能的功率和电压的稳定。同理,在转速下降的情况下,当发电机负载增加时,电能消耗增大,导致输出电压下降,可以控制增加导通角,保证输出电能的功率和电压的稳定,负载减小情况同理。

3 自适应遗传算法

为抑制输出电压的脉动,保证在开关磁阻发电机转速和负载发生变化时,电压能够快速、准确地稳定在参考电压,本文结合自适应算法快速调节和遗传算法准确寻优的特点,提出了自适应遗传角度控制策略。

3.1 自适应算法

根据开关磁阻发电机的工作原理和对输出电压脉动因素的分析,开通角和关断角都会影响输出电压,但由于励磁电流在电感下降区有显著的上升,相电流波形开通角变化比较敏感,实际采用角度位置控制时,一般先固定关断角,对开通角进行调节。

对于三相 12/8 开关磁阻发电机,开通角和关断角的变化范围为 $0^\circ \sim 45^\circ$,由于三相电在一个变化周期,即 45° 范围内都需要独立开通和关断一次,因此,导通角最大为 15° 。固定关断角为 30° 。激励参数的最小要求变化为 1% ,因此自适应算法的结构是将调解参数改变 1% ,即导通角改变 0.15° 。

设调解参数导通角 θ 的初始值为 18° ,每次变化 0.15° ,输出电压的设定值为 270 V 。根据之前分析导通角与负载加卸和转速升降的关系可以看出,导通角与负载和转速变化成正比,与电压变化成反比。因此

$$\theta(k) = \begin{cases} \theta(k-1) + 0.15 & U < 270 \text{ V} \\ \theta(k-1) - 0.15 & U > 270 \text{ V} \\ \theta(k-1) & U = 270 \text{ V} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\theta(k-1)$ 为前一相导通角, $\theta(k)$ 为此时导通角。任何一相的导通角通过当前相与其前一相的自适应算法得到,本相导通角的改变在本相开始工作之前完成。上述 4 种情况,即转速上升,转速下降,负载增加和负载减小,会使电压出现较大幅度的变化,通过自适应算法调节使其电压稳定,如负

载增加,电压下降,调节增大导通角,为兼顾输出电压脉动调节的准确性,使电压脉动值较小,需要切换至遗传算法,寻找最优开通角和关断角。

3.2 遗传算法

模拟生物在自然环境下进行遗传过程的遗传算法是一种全局优化概率搜索方法。遗传算法对于解决非线性、多变量的复杂问题比较有效。在达尔文生物进化论的启发下,人们构建了遗传算法。根据实际自然界中物种进化的规律,在适者生存和物种遗传进化的思想指导下,这种算法提供了搜索优化方案的新思路。遗传算法采用适应度函数作为评价标准,每一代通过复制、交叉及变异产生下一代,并且下一代的适应度函数值会优于上一代,在不断遗传的过程中满足一定的条件停止算法,得到最优输出参数。在自适应算法将输出电压控制在一定脉动范围的基础上,采用遗传算法对小范围的开通角和关断角进行寻优,可以快速精确地减小输出电压脉动。

控制器设计的目的是确定合适的开通角和关断角以减小输出电压脉动,因此系统应满足误差最小,适应度函数指导遗传算法不断进行复制、交叉及变异产生下一代,进行寻优,基于实际输出需求,本文采用的适应度函数形式为

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (14)$$

式中 $e(t)$ 为输出误差。

算法流程:

(1)对于参数进行实数制编码,因为实数制编码相较于二进制编码对于变异操作的种群稳定性较好,可操作性强,易于编程,初始化种群的 m 个个体。

(2)进行适应值计算 $J_1^1, J_1^2, \dots, J_1^m$, 判断是否符合要求。

(3)种群个体按照其适应值与最大适应值的比例复制到下一代,取出适应值最大个体,随机产生 m 个个体,计算并筛选这些个体的适应值和与适应值最大个体的基因差别,补充到下一代种群使其个体数为 m 个。

(4)对下一代的个体对按交叉概率 P_c 进行交叉,即部分基因互换,禁止基因差别较小的个体对进行交叉,计算适应值,保留适应值较大的个体对。

(5)按变异概率 P_m 对某些个体进行改动,计算适应值,保留适应值较大的个体。

(6)重复步骤(2~5),直到满足要求或达到最大代数。

参数选取为群体规模 $m=20$, 终止代数 30, 交叉概率 P_c 取 0.7~0.9, 变异概率 P_m 取 0.01~0.02。根据自适应遗传算法的基本原理,开关磁

阻发电机角度控制系统的结构框图如图 3 所示。

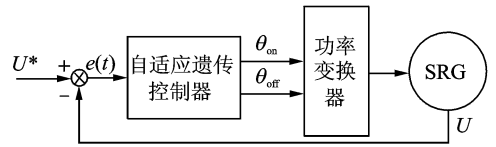


图 3 SRG 角度位置控制系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of angle position control of SRG

4 仿真及实验验证

4.1 仿真分析

本文利用 Ansoft Maxwell14.0 中的 RMxpert 软件和 Maxwell 2D 软件建立 Ansoft 开关磁阻发电机模型,得到其磁链、角度和电流的关系。在 Matlab/Simulink 中将得到的关系数据进行变化得到电感、角度和电流关系,同时将两组关系导入到查表模块,依此搭建 12/8 开关磁阻发电系统的模型。模型的励磁方式为自激励磁,高速开关磁阻发电机的额定输出电压为 270 V,额定转速为 2 000 r/min,定子级数为 12,转子级数为 8,额定功率为 2.2 kW。在电阻性负载 $R=66 \Omega$, 蓄电容 $C=1\ 000 \mu\text{F}$, 相绕组内阻 $r=0.01 \Omega$ (可以忽略不计), 初始转速为 2 100 r/min 的情况下,对系统转速上升、转速下降、突加负载和突减负载情况进行了仿真。所有仿真曲线自上到下分别为自适应控制、遗传算法和自适应遗传算法输出电压波形图。

如图 4,5 所示,转速上升到 2 200 r/min 和下降到 2 000 r/min,3 种算法比较可以看出,遗传算法的超调量最小,输出电压脉动最小,但调解时间最长,自适应控制调解时间最短,但超调量最大,输出电压脉动最大,自适应遗传算法兼顾快速性和准确性。对于负载变化如图 6,7 所示,加到满载和卸载到 $R=15 \Omega$,各算法对输出电压优化情况与转速上升和下降的情况类似。具体仿真数据如表 1 所示。

根据仿真结果可以看出转速发生变化时,3 种控制优化下的输出电压脉动没有发生较大变化,而

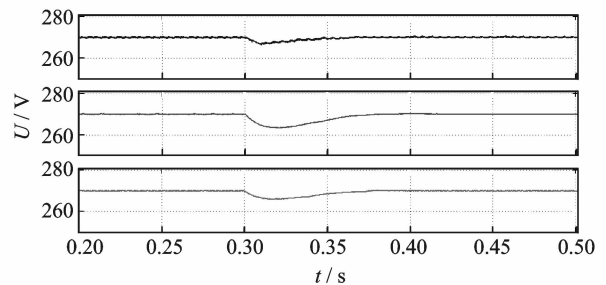


图 4 转速上升电压变化比较

Fig. 4 Comparison of voltage changes with rising speed

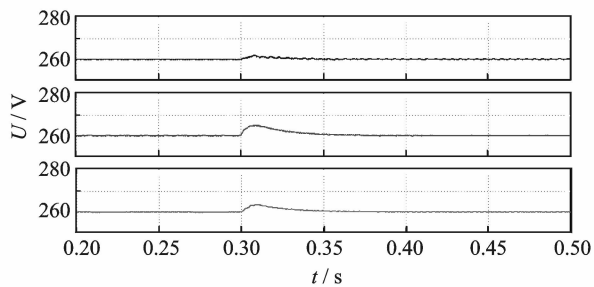


图 5 转速下降电压变化比较

Fig. 5 Comparison of voltage changes with descending speed

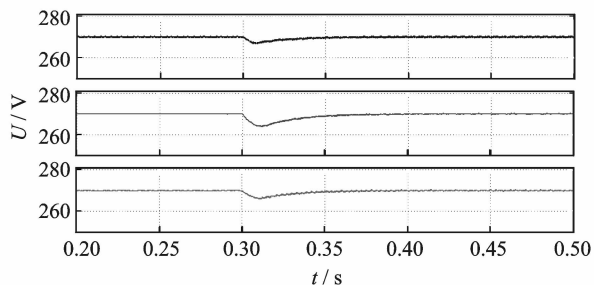


图 6 突加负载电压变化比较

Fig. 6 Comparison of voltage changes with increased load

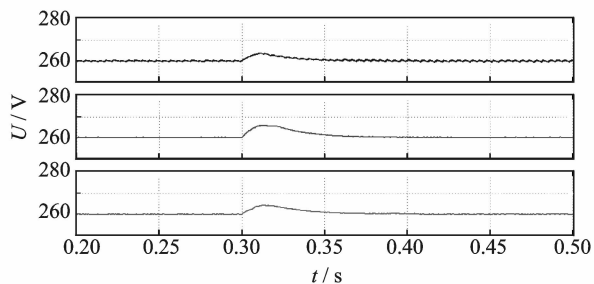


图 7 突卸负载电压变化比较

Fig. 7 Comparison of voltage changes with reduced load

加卸负载时,突加负载输出电压脉动上升,突卸负载时输出电压脉动下降。通过分析可知,转速上升后,励磁和续流发电时间减小,需要增大导通角控制输出电流保证输出功率不变,因此输出电压脉动基本不变,转速下降同理。突加负载,输出电压下降,需要增大导通角提高输出电流,但励磁和续流发电时间不变,因此输出电压的脉动变大,突卸负

载同理。

4.2 实验验证

为验证所提自适应遗传角度位置控制方法的可行性,本文以 TMS320F2812 芯片为数字控制器,利用一台 12/8 的三相 2.2 kW 的开关磁阻发电机为研究控制对象,额定转速为 2 000 r/min。在转速和负载发生变化时,通过 DSP 系统采集电压值,计算实际电压与给定电压的偏差,计算最优开通角和关断角控制输出电压快速稳定。

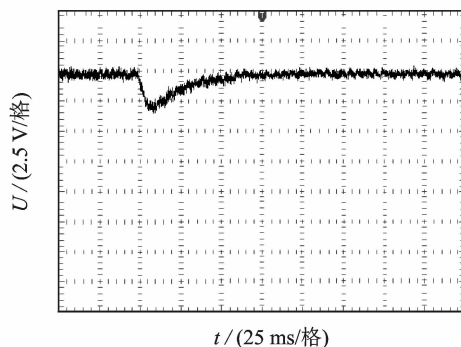


图 8 自适应控制电压变化图

Fig. 8 Voltage change with adaptive control

通过原理分析和仿真验证,自适应控制、遗传算法和自适应遗传算法在 4 种情况下的结果规律大致相同。由于篇幅有限,以转速上升情况为例,负载为 66 Ω 的情况下,转速由 2 100 r/min 上升到 2 200 r/min,实验验证结果如图 8—10 所示,自适应控制电压脉动为 1.48 V,调节时间为 0.061 s,超调量为 1.26%;遗传算法电压脉动为 1.05 V,调节时间为 0.140 s,超调量为 3.16%;自适应遗传算法电压脉动为 1.22 V,调节时间为 0.091 s,超调量为 1.97%,实验结果与仿真结果所反映的 3 种方法控制效果大致相同。在表 2 中列出突升转速、突降转速、突加负载和突卸负载情况下电压的调节时间、超调量和电压脉动值。

为验证转速和负载对输出电压优化调节的影响,实验设计对转速上升和突加负载两种情况的自适应遗传算法一相电流进行分析。如图 11 所示,在转速由 2 100 r/min 上升到 2 200 r/min 时,电

表 1 3 种控制优化仿真性能比较

Tab. 1 Simulation comparison of three kinds of control optimization performance

实验类别	调节时间/s			电压超调/%			电压脉动/V		
	自适应	遗传	自适应遗传	自适应	遗传	自适应遗传	自适应	遗传	自适应遗传
突升转速	0.063	0.138	0.073	1.27	2.48	1.51	0.79	0.35	0.47
突降转速	0.059	0.110	0.071	0.79	1.95	1.29	0.75	0.41	0.45
突加负载	0.067	0.103	0.082	1.26	2.29	1.56	1.01	0.54	0.65
突卸负载	0.058	0.107	0.079	1.14	2.17	1.32	0.83	0.39	0.54

表2 3种控制优化实验性能比较

Tab. 2 Experimental comparison of three kinds of control optimization performance

实验类型	调节时间/s			电压超调/%			电压脉动/V		
	自适应	遗传	自适应遗传	自适应	遗传	自适应遗传	自适应	遗传	自适应遗传
突升转速	0.061	0.140	0.091	1.48	3.16	1.97	1.48	1.05	1.22
突降转速	0.065	0.134	0.087	1.39	3.04	1.45	1.37	0.98	1.12
突加负载	0.081	0.125	0.094	1.57	3.34	1.97	1.93	1.27	1.46
突卸负载	0.079	0.121	0.087	1.54	3.21	1.89	1.87	1.13	1.35

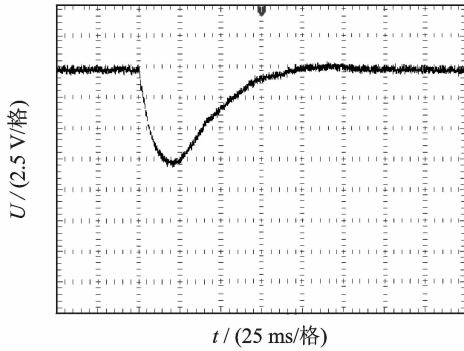


图9 遗传算法电压变化图

Fig. 9 Voltage change with genetic algorithm

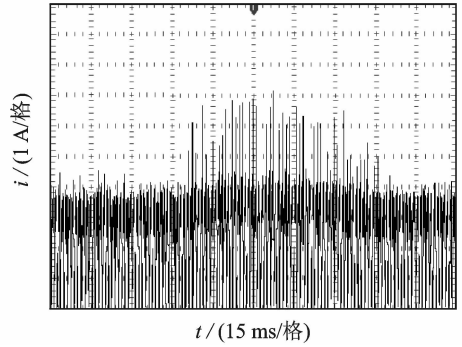


图11 转速上升电流变化图

Fig. 11 Current change with rising speed

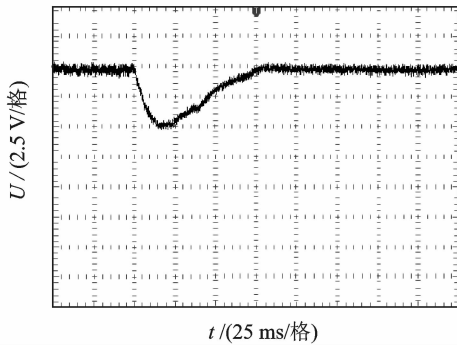


图10 自适应遗传算法电压变化图

Fig. 10 Voltage change with adaptive genetic algorithm

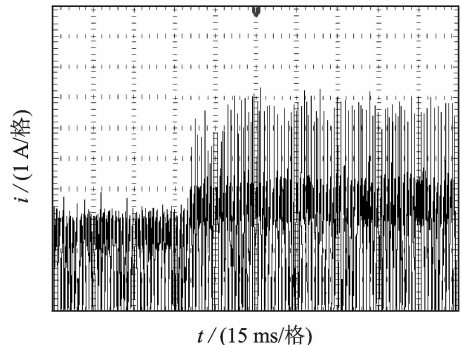


图12 突加负载电流变化图

Fig. 12 Current change with increased load

压降低,调节开通角和关断角使输出功率保持不变,输出电流增大,当电压调节到设定值时,电流最终与转速上升之前相同,输出电压脉动基本不变;如图12所示,在负载有半载突加到满载后,电流快速升高,并且进行控制调节,为满足新的输出电压,电流增大,导致输出电压脉动增大。

5 结束语

本文提出了一种适用于高速开关磁阻发电机输出电压优化的自适应遗传角度位置控制策略。首先分析了开关磁阻发电机的基本原理和高速采用角度位置控制的原因,然后针对影响输出电压的因素,即转速和负载变化,设计自适应遗传角度位置控制器。仿真和实验结果表明,在输出电压优化的效果方面,自适应遗传算法可以兼顾快速性和准确性,

自适应遗传算法分段优化角度可以方便对每一段算法进行调节、简单可靠,易于在实际系统实现。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
WANG Honghua. Switched reluctance motor speed control technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014.
- [2] BOSTANCI E, MOALLEM M, PARSAPOUR A, et al. Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: A comparative study[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1):58.
- [3] 蒯松岩, 汤锐智, 马金洋, 等. 基于电感模型的开关磁阻电机参数优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30

- (7):97-104.
- KUAI Songyan, TANG Ruizhi, MA Jinyang, et al. Parameter optimization of the switched reluctance motor based on the inductance model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(70):97-104.
- [4] 甘醇, 吴建华, 王宁, 等. 一种零电压保持开通的开关磁阻电机再生制动控制策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(9):8.
GAN Chun, WU Jianhua, WANG Ning, et al. Regenerative braking control strategy for switched reluctance motors with zero-voltage loop hold[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(9):8.
- [5] SONG Shoujun, LIU Weiguo, DIETER P, et al. Detailed design of a high speed switched reluctance starter/generate or for more/all electric aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010(23):216-226.
- [6] 慕永云, 彭国印, 张云, 等. 基于 STM8 位的高速开关磁阻电机控制器[J]. 微电机, 2017, 50(2):60-64.
MU Yongyun, PENG Guoyin, ZHANG Yun, et al. High speed switched reluctance motor controller based on STM8[J]. Micromotors, 2017, 50(2):60-64.
- [7] PRABHU V V, RAJINI V, BALAJI M, et al. A comparative study of operating angle optimization of switched reluctance motor with robust speed controller using PSO and GA[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(2):551-559.
- [8] BENTOUNSI A, REBAHI F, BOUCHEKARA H. Multi-objective optimization design of 8/6 switched reluctance motor using GA and PSO algorithms [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 15(4):168-175.
- [9] ZAN Xiaoshu, HUO Yingjie, GU Jason. Optimization research of turn-on angle and turn-off angle based on switched reluctance starter/generator system [J]. Electrical & Computer Engineering, 2015, 2015:864-869.
- [10] 张云, 王知学, 付东山, 等. 关断角优化的开关磁阻电机高速控制[J]. 电气传动, 2017, 47(3):27-31.
ZHANG Yun, WANG Zhixue, FU Dongshan, et al. Turn off angle optimization for switched reluctance motor high speed control [J]. Electric Drive, 2017, 47(3):27-31.
- [11] WANG Shunyu, LIU Founyuan, TSENG C L, et al. Fuzzy inference of excitation angle for direct torque-controlled switch-ed reluctance motor drives [C] // IEEE International Conference on Systems. [S. l.]: IEEE, 2015:1139-1144.
- [12] LIU Zhijian, NGUYEN L M T, NGUYEN L T, et al. Switching-off angle control for switched reluctance motor using adaptive neural fuzzy inference system[J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2015 4(1):39-45.
- [13] SARAVANAN P, ARUMUGAM R, SENTHIL KUMARAN M. A based speed control of SRM with optimized switching angles by self tuning[J]. Circuits and Systems, 2016, 7:1530-1545.
- [14] 赵光新. 开关磁阻电机变速驱动系统的研究[D]. 武汉:华中理工大学, 1990.
ZHAO Guangxin. Research on variable speed drive system of switched reluctance motor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1990.
- [15] 彭寒梅, 易灵芝, 朱建林. 开关磁阻发电机输出电压脉动抑制的研究及仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(5):1237-1241.
PENG Hanmei, YI Lingzhi, ZHU Jianlin. Study and simulation for switched reluctance generator output voltage ripple reduction [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(5):1237-1241.

(编辑:陈琚)

