

文章编号:1671-6833(2025)01-0126-07

一种开关磁阻电机转矩分配优化控制策略

李红伟^{1,2}, 罗华林¹

(1. 西南石油大学 电气信息学院, 四川 成都 610500; 2. 成都智创利源科技有限公司, 四川 成都 611730)

摘要: 针对开关磁阻电机存在转矩脉动较大的问题, 通过对传统余弦型转矩分配函数进行改进, 提出一种开关磁阻电机补偿型余弦转矩分配优化控制策略。根据总转矩与期望转矩的稳态偏差, 引入傅里叶逼近曲线, 对分配转矩进行补偿, 并采用双关断角的功率变换电路驱动控制, 进行零电压续流, 提高实际转矩对分配转矩的跟踪能力。为获得更好的控制性能, 进一步采用遗传算法, 以降低转矩脉动和铜损为目标, 对控制参数进行了全局寻优。以1台四相8/6极开关磁阻电机为控制对象进行建模仿真, 来验证所提策略的有效性。结果表明: 与传统余弦型转矩分配控制相比, 所提改进控制策略提升了电机在不同转速下的性能, 转矩脉动降低最高达68.89%, 均方根电流减小最高达11.74%。

关键词: 开关磁阻电机; 转矩分配函数; 转矩补偿; 双关断角; 转矩脉动

中图分类号: TM301.2; TM352

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.01.008

开关磁阻电机是一种特种电机, 具有结构简单、效率高、运行可靠和响应快速等优点^[1]。为解决开关磁阻电机的转矩脉动和噪声等问题, 研究人员采用了PID控制^[2]、滑模控制^[3]、转矩分配控制^[4-5]等控制策略。其中, 转矩分配控制策略将总目标转矩分解为多个单相目标转矩, 通过对单相转矩的控制使合成转矩脉动最小, 取得了较好的效果。

潘晓晨等^[6]采用了间接转矩控制, 所提方法在低速时具有良好的控制效果, 但在高速时受电压电流转换的限制, 跟踪能力较差。费晨等^[7]设计了一种反馈型转矩分配函数, 对电机进行直接转矩控制, 弥补了间接转矩控制在高速时控制效果差的缺陷。贾彤等^[8]对直线型转矩分配函数进行补偿, 在换相过程中引入正弦补偿函数, 结果表明所提方法对直线型转矩分配函数具有良好的补偿效果, 在高速情况下亦能降低转矩脉动、减小铜耗。Xue等^[9]的研究表明, 在同时考虑最大调速范围和最小铜耗时, 可优选余弦型分配函数。张嘉贺等^[10]以换相阶段的中点为断点, 提出一种二分段转矩分配补偿函数, 降低了转矩脉动, 但分段点较为固定, 补偿能力有限。王辉等^[11]对转矩分配函数进行二次型函数补偿, 得

到了较好的补偿控制效果, 但二次型补偿函数形式较为固定, 对转矩脉动的各阶段控制效果并不理想。综上, 目前转矩分配控制策略存在换相区间转矩脉动大和转矩补偿控制策略补偿能力较弱的问题。Stephenson等^[12]提出向电流注入谐波进行补偿, 取得了很好的转矩脉动抑制效果。马铭遥等^[13]提出分段注入谐波补偿电流的方法, 提高了分段可控性。

本文对开关磁阻电机采用直接瞬时转矩控制, 通过改进余弦型转矩分配控制策略, 借鉴注入谐波电流进行补偿的思想, 设计了一种余弦型转矩分配的补偿控制方法。根据实际转矩与期望转矩的稳态差值, 引入多项正、余弦函数叠加形成傅里叶逼近曲线, 对分配转矩进行补偿。为提高实际转矩对分配转矩的跟踪能力, 提出了一种双关断角控制方式, 避免关断相电流迅速跌落导致转矩迅速下降所引起的转矩脉动, 使关断相转矩可调节性更好, 将转矩整体维持在平稳状态。为获得更好的补偿效果和整体控制性能, 本文进一步以降低转矩脉动和铜损为优化目标, 采用遗传算法对开通角、关断角1、关断角2、重叠角和补偿系数进行寻优。以1台四相8/6极开关磁阻电机为控制对象, 搭建仿真模型, 通过仿真

收稿日期: 2024-04-15; 修订日期: 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905457); 四川省重点研发计划项目(2022YFG0060)

作者简介: 李红伟(1977—), 男, 河南安阳人, 西南石油大学教授, 博士, 主要从事综合能源系统、智能电机设计及控制技术研究, E-mail: lhwmial@126.com。

引用本文: 李红伟, 罗华林. 一种开关磁阻电机转矩分配优化控制策略[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(1): 126-132. (LI H W, LUO H L. A torque sharing optimization control strategy for switched reluctance motors[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(1): 126-132.)

结果验证所提控制策略的可行性和有效性。

1 转矩分配控制策略

1.1 余弦型转矩分配函数

转矩分配定义为

$$\begin{cases} T_i(\theta) = T_{ref} \cdot f_i(\theta), & i = 1, 2, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m f_i(\theta) = 1, & 0 \leq f_i(\theta) \leq 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_i(\theta)$ 为第 i 相分配转矩, $N \cdot m$; T_{ref} 为期望转矩, $N \cdot m$; m 为电机相数; $f_i(\theta)$ 为第 i 相转矩的分配函数。

分配函数分为直线型、指数型、余弦型和立方型。其中,余弦型分配函数表示为式(2),其波形如图 1 所示。

$$f_i(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta < \theta_{on}; \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta - \theta_{on}}{\theta_{ov}} \pi\right), & \theta_{on} \leq \theta < \theta_{on} + \theta_{ov}; \\ 1, & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta < \theta_{off}; \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta - \theta_{off}}{\theta_{ov}} \pi\right), & \theta_{off} \leq \theta < \theta_{off} + \theta_{ov}; \\ 0, & \theta_{off} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \tau_r. \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_{on} 为开通角, $^\circ$; θ_{ov} 为相邻两相重叠角, $^\circ$; θ_{off} 为关断角, $^\circ$; τ_r 为转子周期角, $^\circ$ 。

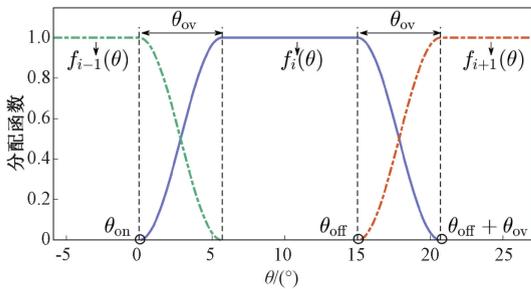


图 1 余弦型分配函数波形

Figure 1 Cosine distribution function waveform

1.2 新型补偿转矩分配函数

由图 1 可知,余弦型分配函数只与开通角、关断角和重叠角有关,可调节性受限。如图 2 所示,总转矩曲线围绕期望转矩曲线上下波动,存在较大转矩脉动。通过改变开通角、关断角、重叠角调节分配转矩,虽可在一定程度上拉低转矩波峰或拉高波谷,从而减小转矩脉动,但对波峰和波谷的调节不能兼得,对转矩脉动的抑制效果甚微。针对此问题,本文在补偿思想的基础上,提出一种新型补偿方式:对总转矩与期望转矩之间的差值,引入傅里叶逼近来补偿分配转矩、修正偏差、抑制转矩脉动。

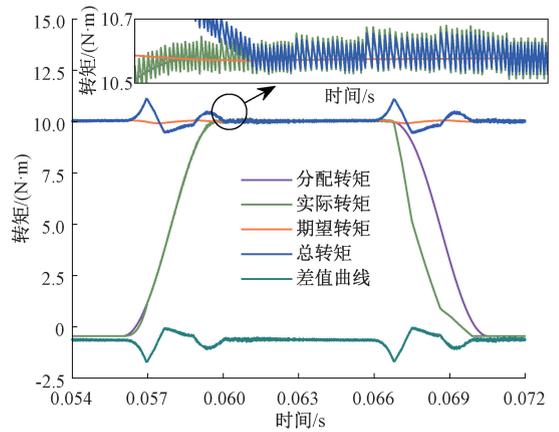


图 2 某相转矩示意图

Figure 2 Schematic diagram of torque for a certain phase

由于电机运行具有周期性,差值曲线也具有周期性,可用由有限个正弦函数和余弦函数构成的无穷级数叠加,对差值曲线进行傅里叶逼近。在实际调节过程中,差值曲线无法事先获取,因此,假设存在补偿函数 $h(x)$, 由有限个正弦函数和余弦函数叠加构成, $h(x)$ 表示为

$$h(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\omega x + b_n \sin n\omega x). \quad (3)$$

式中: a_0 为常数; N 为项数; a_1, a_2, \dots, a_n 为余弦项系数; b_1, b_2, \dots, b_n 为正弦项系数; ω 为三角函数角频率。通过调节 a_n, b_n 和 ω 的值,可使 $h(x)$ 反向逼近差值曲线。如图 3 所示的补偿曲线是对图 2 中差值曲线的一种逼近,可见分配转矩在加入补偿后,转矩脉动得到了有效抑制。

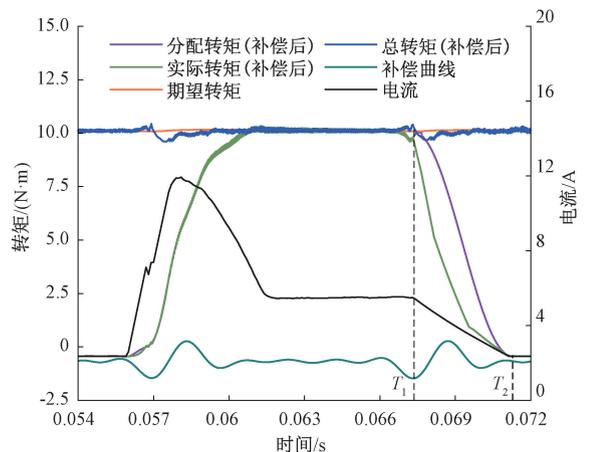


图 3 某相转矩和电流示意图(补偿后)

Figure 3 Schematic diagram of torque and current of a certain phase (after compensation)

1.3 双关断角控制策略

另一方面,由图 3 可知,在 $T_1 \sim T_2$ 时间段内,关断相实际转矩无法快速跟踪分配转矩,从而导致总转矩的跌落。这是由于在 T_1 时刻,功率变换电路关断,关断相相电流迅速跌落,由于转矩与电流平方的

大小、电感斜率有关^[14],因此实际转矩迅速减小,无法跟踪分配转矩。开关磁阻电机使用的不对称半桥功率变换电路如图4所示,该电路有3种工作模式^[15]:当开关 S_1 、 S_2 均导通时,电路工作在励磁状态;当开关 S_1 、 S_2 均关断时,电路工作在去磁状态,相电流快速减小至0;当开关 S_1 关断、 S_2 导通时,电路工作在零电压续流状态,电流缓慢下降。

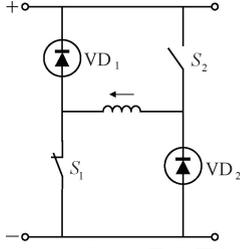


图4 功率变换电路(零电压续流状态)

Figure 4 Power conversion circuit (zero-voltage freewheeling state)

传统开关策略只有两种工作模式:开关 S_1 、 S_2 同时导通或同时关断。关断相电路关断后,相电流迅速跌落,导致该相实际转矩无法跟踪分配转矩。为放缓电流下降速度,延长续流时间,提高实际转矩对分配转矩的跟踪能力,避免总转矩跌落,本文设计了一种双关断角控制策略:对开关 S_2 增设关断角 θ_{off2} ,即 S_1 在 θ_{off1} 处关断, S_2 在 θ_{off2} 处关断,功率变换电路将工作在三电平状态:

$$S(S_1, S_2) = \begin{cases} S(0, 0), & 0 \leq \theta < \theta_{on}; \\ S(1, 1), & \theta_{on} \leq \theta < \theta_{off1}; \\ S(0, 1), & \theta_{off1} \leq \theta < \theta_{off2}; \\ S(0, 0), & \theta_{off2} \leq \theta \leq \tau_r. \end{cases} \quad (4)$$

当开关 S_1 和 S_2 同时关断时,电流迅速减小。当设置两个关断角时,开关 S_1 关断后, S_2 仍导通一段时间后,再关断,绕组相电流下降幅度变缓,如图5所示。

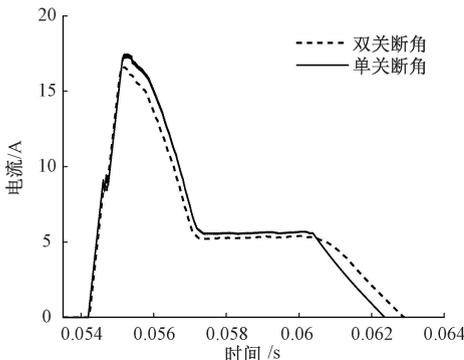


图5 某关断相相电流

Figure 5 A certain shutdown phase current

综上,加入补偿函数并设置双关断角后,新的余弦型分配函数 $F_i(\theta)$ 可表示为

$$F_i(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta < \theta_{on}; \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta - \theta_{on}}{\theta_{ov}} \pi\right) + h(\theta), & \theta_{on} \leq \theta < \theta_{on} + \theta_{ov}; \\ 1, & \theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta < \theta_{off1}; \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\theta - \theta_{off1}}{\theta_{ov}} \pi\right) + h(\theta), & \theta_{off1} \leq \theta < \theta_{off1} + \theta_{ov}; \\ 0, & \theta_{off1} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \tau_r. \end{cases} \quad (5)$$

2 基于遗传算法的多目标优化

2.1 目标函数和约束条件

为了对控制系统进行整体寻优,本文以降低转矩脉动和铜耗为优化目标,把补偿函数项系数、开通角、关断角1、关断角2和重叠角作为约束条件,优化目标可表述为

$$\begin{cases} f_1 = \min(T_r) = \min\left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{mean}}}\right); \\ f_2 = \min(I_{\text{rms}}) = \min\left(\sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i^2 dt}\right). \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_r 为转矩脉动; T_{\max} 、 T_{\min} 和 T_{mean} 分别为转矩最大值、最小值和平均值, $\text{N} \cdot \text{m}$; I_{rms} 为电流均方根, A; f_1 、 f_2 均为目标函数。

为加快收敛,体现各目标函数的相对重要程度,定义评价函数为

$$\begin{cases} v(F) = \sum_{i=1}^2 \lambda_i f_i; \\ \sum_{i=1}^2 \lambda_i = 1. \end{cases} \quad (7)$$

将多目标优化问题转换为单目标优化问题:

$$v(F) = \min(\lambda \cdot T_r + (1 - \lambda) \cdot I_{\text{rms}}) = \min\left(\lambda \cdot \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{mean}}} + (1 - \lambda) \cdot \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i^2 dt}\right). \quad (8)$$

式中: λ 为权重系数,本文取0.75。

约束条件表述为

$$\begin{cases} 0 \leq \theta_{on} \leq 3.1; \\ 15 \leq \theta_{off1} \leq 21.3; \\ 4.4 \leq \theta_{ov} \leq 7.5; \\ \theta_{off1} \leq \theta_{off2} \leq \theta_{off1} + 0.5\theta_{ov}; \\ 0 \leq a_n \leq 1, n = 1, 2, \dots, N; \\ 0 \leq b_n \leq 1, n = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (9)$$

式中: N 为项数。 N 越大,遗传算法寻优难度越大。为减小寻优难度,固定开通角、关断角和重叠角,调

整 N ,对分配转矩进行补偿。不同 N 值下,补偿曲线与差值曲线的相关系数平方值、均方根差如表 1 所示。当 N 为 5 时,逼近效果和转矩脉动均能达到预期目标,因此取 $N = 5$ 。

表 1 不同 N 值下的控制效果

Table 1 Fitting effects of different N values

转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	负载/ ($N \cdot m$)	N	R^2	$RMSE$	转矩脉 动/%
500	10	3	0.89	0.12	16.86
		4	0.90	0.12	14.91
		5	0.92	0.10	10.58
1 000	10	3	0.96	0.70	19.18
		4	0.98	0.47	17.25
		5	0.99	0.39	11.06

2.2 寻优过程

遗传算法的求解过程包括个体编码、初始种群化、适应度计算、选择、交叉和变异等^[16]。在实际调节过程中,可通过遗传算法对式(3)中的各项系数进行寻优求解,生成补偿值。为加快收敛速度,本文借助 MATLAB fit 函数对差值曲线进行拟合,辅助遗传算法寻优。寻优流程如图 6 所示,分为两阶段寻优。

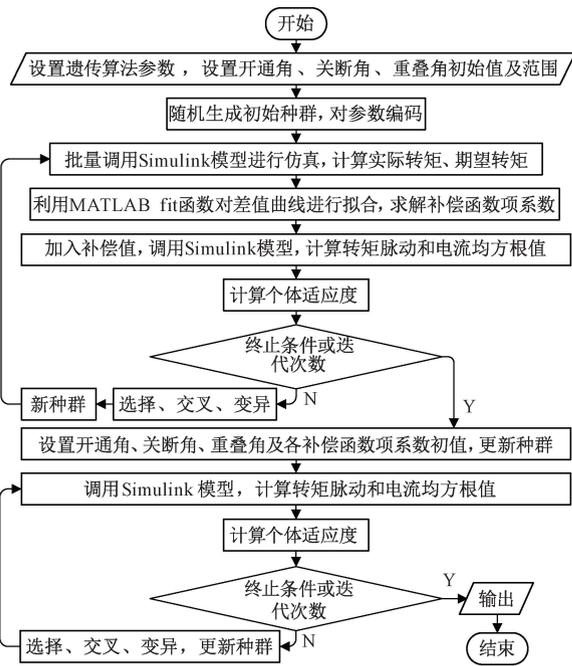


图 6 两阶段寻优流程图

Figure 6 Two-stage optimization flow chart

在阶段一,将开通角、关断角 1、关断角 2 和重叠角作为约束条件,种群大小为 50,最大迭代次数为 100。仿真计算实际转矩与期望转矩的差值,并求解补偿系数,生成补偿值。对补偿后的系统进行仿真,计算目标 T_r 和 I_{rms} 的值,适应度

Fit 定义为

$$Fit = K \cdot \left(\lambda \frac{1}{T_r} + (1 - \lambda) \frac{1}{I_{rms}} \right) \quad (10)$$

式中: K 为适应度系数,为更大概率保留优质个体,对转矩脉动小于 15%、10%、7%、5% 的个体, K 分别取 2、3、4、5。

迭代求解阶段一的 Pareto 解,包括开通角、关断角 1、关断角 2 和重叠角。

在阶段二,将 a_n 、 b_n 作为约束条件,生成长度为 40 位的二进制编码串:

$$\underbrace{c_{40}c_{39}c_{38}c_{37} \cdots c_{24}c_{23}c_{22}c_{21}}_{b_5} \underbrace{\cdots c_{24}c_{23}c_{22}c_{21}}_{b_1} \underbrace{\cdots c_4c_3c_2c_1}_{a_1}$$

将种群大小设为 100,其中,第一个个体赋值为阶段一的 Pareto 解,最大迭代次数设为 1 000,阶段二的解为最后优化结果。

3 系统仿真与分析

3.1 系统仿真建模

为验证所提方法的有效性,以一台四相 8/6 极开关磁阻电机为研究对象,基本参数如表 2 所示。

表 2 电机参数

Table 2 Motor parameters

参数	数值	参数	数值
相数	4	转子外径/mm	113
定子极数	8	定子内径/mm	114
转子极数	6	定子外径/mm	213
额定功率/kW	7.5	定子极弧/(°)	23
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	500	转子极弧/(°)	21
转子内径/mm	50	轴长/mm	135

使用 MATLAB/Simulink 搭建控制系统的仿真模型,包括转矩分配模块、滞环比较模块、功率变换器模块、开关磁阻电机模块、位置传感器模块和补偿模块,如图 7 所示。转速环采用 PID 控制产生期望转矩,调用 sim 函数对 Simulink 模型进行批量仿真。补偿模块利用 fit 函数对差值进行拟合,生成补偿值。位置传感器 1、2 分别对应关断角 1、2,产生信号以控制开关动作。

3.2 仿真结果及分析

将负载设置为恒定负载 $10 N \cdot m$,转速分别设置为 100、500、1 000 r/\min 。仿真得到各转速下余弦型转矩分配控制、余弦补偿型转矩分配控制、余弦补偿型双关断角转矩分配控制以及优化后的转矩波形如图 8 所示,余弦型转矩分配控制与本文方法的电流波形如图 9 所示。

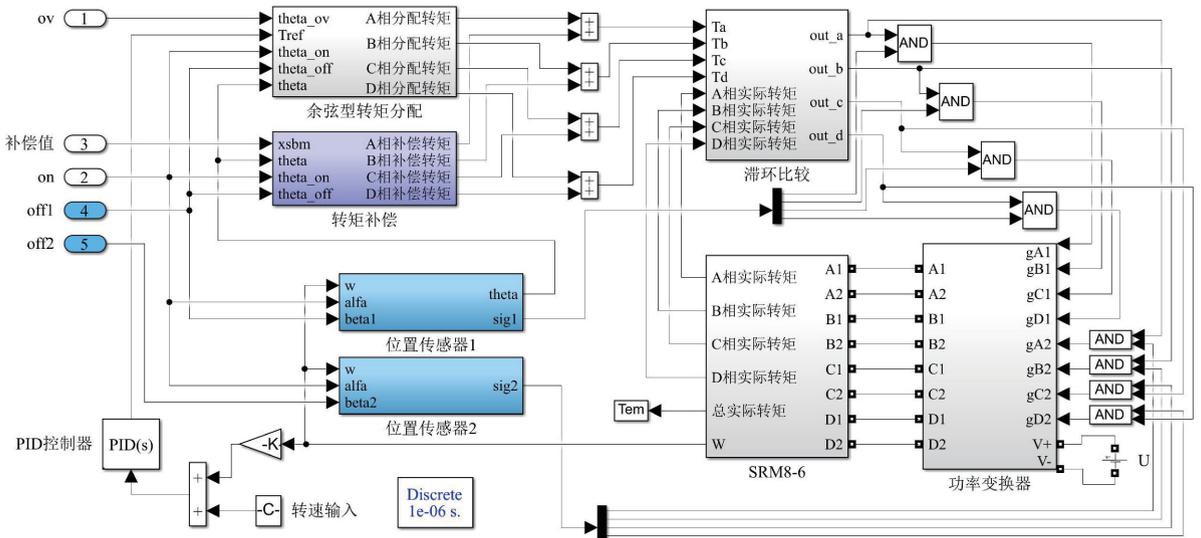


图7 控制系统仿真模型

Figure 7 Simulation model of control system

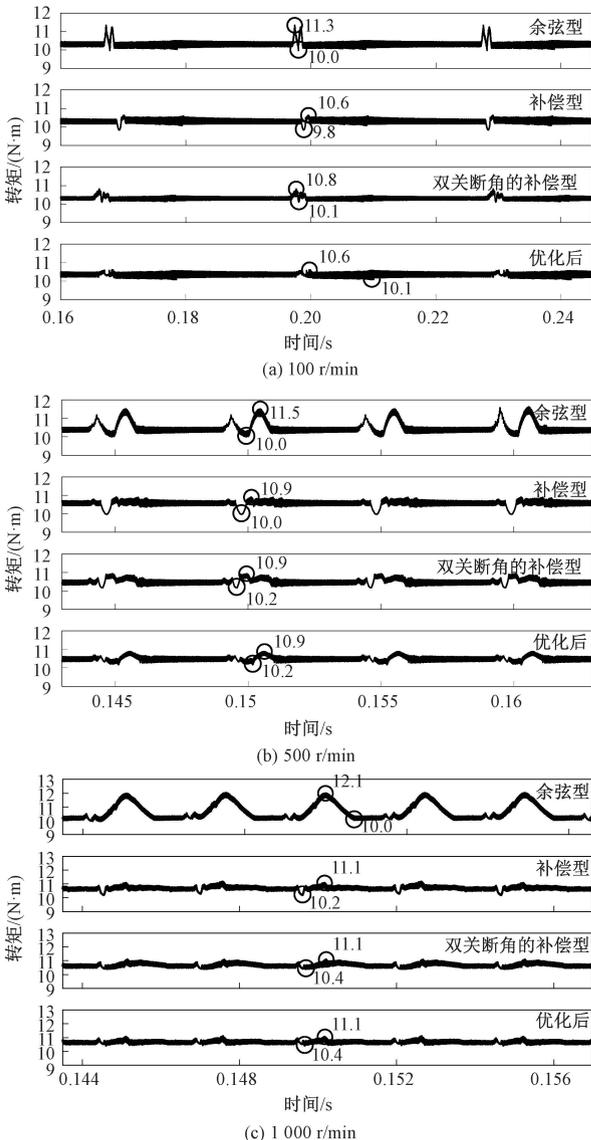


图8 不同控制策略下的转矩脉动波形
Figure 8 Torque ripple waveform with different control strategies

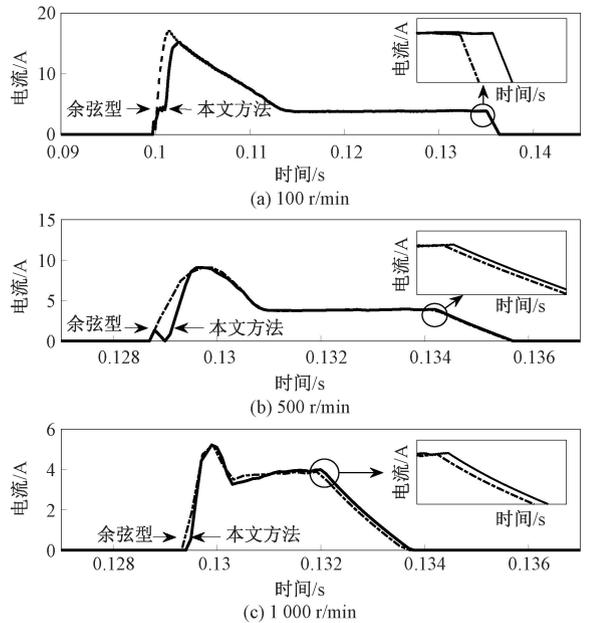


图9 不同转速下的电流波形

Figure 9 Current waveforms at different speeds

首先,对比余弦型转矩分配控制策略和补偿型余弦转矩分配控制策略的转矩脉动波形。从图8可以看出,在低速、额定转速和高速情况下,转矩脉动分别降低了41.6%、39.1%、56.5%。在不同转速情况下,补偿控制策略减小了转矩脉动,对开通相补偿效果明显,验证了补偿控制策略的有效性。但也可以看出,不同转速下,在关断相功率变换电路关断后,相电流迅速下降,实际转矩无法跟踪分配转矩,因此仍存在转矩脉动波谷。

其次,对比补偿型余弦转矩分配控制和双关断角的补偿型余弦转矩分配控制。从图8可以看出,双关断角控制策略弥补了关断相电路关断后相电流迅速下降所带来的转矩跌落。两个关断角使功率变

换电路工作在三电平状态下,电流下降变慢,提高了实际转矩对分配转矩的跟踪能力,拉高了转矩脉动波谷,验证了双关断角控制策略的有效性。

再次,对比优化前后双关断角的补偿型余弦转矩分配控制的转矩脉动波形。从图 8 可以看出,经过遗传算法寻优后,电机换相转矩脉动进一步得到抑制,基本实现平稳换相,验证了结合遗传算法优化的有效性。

最后,对比余弦型转矩分配控制和优化后的双关断角补偿型余弦转矩分配控制(即本文方法)的转矩、电流波形。从图 8 可以看出,本文方法在不同转速情况下补偿分配转矩,减小了转矩脉动;从图 9 可以看出,本文方法在不同转速情况下,减小了均方根电流。在低速、额定转速和高速情况下,转矩脉动分别降低了 61.22%、52.79%、68.89%,均方根电流分别减小了 11.74%、7.64%、0.80%,具体效果如表 3 所示。

表 3 不同控制策略下的性能对比

Table 3 Performance comparison with different control strategies

转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	转矩脉动/%		均方根电流/A	
	余弦型	本文方法	余弦型	本文方法
100	13.28	5.15	12.52	11.05
500	14.36	6.78	7.46	6.89
1 000	18.80	5.85	5.03	4.99

4 结论

本文针对余弦型转矩分配控制转矩脉动大、跟踪能力差的问题,提出一种优化控制策略,仿真结果验证了所提方法的有效性。结果表明:

(1)本文所提补偿策略,对分配转矩进行有效补偿,降低转矩脉动。在低速、额定转速和高速情况下,转矩脉动分别降低了 41.6%、39.1%、56.5%。

(2)本文所提双关断角控制策略,提高了实际转矩对分配转矩的跟踪能力,抑制了转矩脉动。

(3)与余弦型转矩分配控制相比,本文方法减小了转矩脉动和铜耗。在低速、额定转速和高速情况下,转矩脉动分别降低了 61.22%、52.79%、68.89%,均方根电流分别减小了 11.74%、7.64%、0.80%。

在负载工况相对稳定的情况下,与余弦型转矩分配控制相比,本文所提策略在减小转矩脉动和铜耗方面,均具有更好控制效果。但本文方法尚未考虑负载扰动下系统的抗干扰能力,后续需要对控制策略进行进一步改进和完善。

参考文献:

- [1] 张海军. 开关磁阻电机控制与动态仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
ZHANG H J. Control and dynamic simulation of switched reluctance motor[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [2] 安治国, 张振, 张东阳, 等. 模糊自整定 PID 对开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(8): 86-93.
AN Z G, ZHANG Z, ZHANG D Y, et al. Restraining torque ripple of switched reluctance motor by fuzzy self-tuning PID method[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(8): 86-93.
- [3] 韩国强, 陆哲, 吴孟霖, 等. 基于改进滑模控制策略的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5740-5755.
HAN G Q, LU Z, WU M L, et al. Direct instantaneous torque control method for switched reluctance motor based on an improved sliding mode control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5740-5755.
- [4] 白国长, 吴贺松, 郑鹏. 基于立方型转矩分配函数的 SRM 直接转矩控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(1): 48-54.
BAI G C, WU H S, ZHENG P. Direct torque control of switched reluctance motor based on cubic torque sharing function[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(1): 48-54.
- [5] YE J, BILGIN B, EMADI A. An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 726-735.
- [6] 潘晓晨, 张广明, 王德明. 基于改进的转矩分配函数法的 SRM 转矩间接控制[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(5): 1-6.
PAN X C, ZHANG G M, WANG D M. Indirect torque control of SRM based on modified torque sharing function[J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(5): 1-6.
- [7] 费晨, 颜建虎, 汪盼, 等. 基于改进的转矩分配函数法的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 394-400.
FEI C, YAN J H, WANG P, et al. Torque ripple suppression of switched reluctance motor based on modified torque sharing function[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 394-400.
- [8] 贲彤, 聂恒, 陈龙, 等. 一种正弦补偿型转矩分配函

- 数的 SRM 转矩脉动抑制策略[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(8): 100-111.
- BEN T, NIE H, CHEN L, et al. SRM torque ripple suppression strategy based on sinusoidal compensation torque sharing function[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(8): 100-111.
- [9] XUE X D, CHENG K W E, HO S L. Optimization and evaluation of torque-sharing functions for torque ripple minimization in switched reluctance motor drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(9): 2076-2090.
- [10] 张嘉贺, 顾国彪. 基于分段式 TSF 的开关磁阻电机转矩脉动抑制技术[J]. 大电机技术, 2020(1): 43-48.
- ZHANG J H, GU G B. Torque ripple suppression technology of switched reluctance motor based on novel TSF[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2020(1): 43-48.
- [11] 王辉, 游紫露, 李孟秋, 等. 基于遗传算法的 SRM 转矩分配函数优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 144-150.
- WANG H, YOU Z L, LI M Q, et al. Optimization of torque distribution function for switched reluctance motor based on genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(9): 144-150.
- [12] STEPHENSON J M, HUGHES A, MANN R. Torque ripple minimisation in a switched reluctance motor by optimum harmonic current injection[J]. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2001, 148(4): 322.
- [13] 马铭遥, 余发, 杨晴晴, 等. 基于注入分段式谐波电流抑制开关磁阻电机转矩脉动的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 285-291, 366.
- MA M Y, YU F, YANG Q Q, et al. Control strategy of minimizing torque ripples of the switched reluctance motor by injecting piecewise harmonic currents[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 285-291, 366.
- [14] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- WANG H H. *Speed control technology of switched reluctance motor* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [15] 周大林, 陈昊, ORABI M, 等. 一种前端级联 DC/DC 变换器的开关磁阻电机驱动拓扑[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 45-52.
- ZHOU D L, CHEN H, ORABI M, et al. Switched reluctance motor drive topology with front-end cascaded DC/DC converter[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(9): 45-52.
- [16] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- ZHOU M, SUN S D. *Genetic algorithms: theory and applications* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.

A Torque Sharing Optimization Control Strategy for Switched Reluctance Motors

LI Hongwei^{1,2}, LUO Hualin¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. Chengdu Zhichuang Liyuan Technology Co., Ltd., Chengdu 611730, China)

Abstract: Aiming at the problem of larger torque ripple of switched reluctance motors, a compensation cosine torque sharing optimization control strategy for switched reluctance motors was proposed by improving the traditional cosine torque sharing function. Based on the steady-state deviation between the actual torque and the desired torque, the proposed method introduced a Fourier approximation curve to compensate the distributed torque. A power conversion circuit with double-off-angle drive control was used to achieve zero-voltage freewheeling and improve the tracking ability of the actual torque to the distributed torque. To obtain better control performance, a genetic algorithm was further used to globally optimize the control parameters with the goal of reducing torque ripple and copper loss. A four-phase 8/6 pole switched reluctance motor was modeled and simulated to verify the effectiveness of the proposed strategy. The results showed that compared with the traditional cosine torque sharing control, the proposed control strategy could improve the performance of the motor at different speeds, with torque ripple decreased by up to 68.89% and root mean square current reduced by up to 11.74%.

Keywords: SRM; torque sharing function; torque compensation; double-off-angle; torque ripple