

波能直驱互感耦合式开关磁阻发电机的 最佳效率跟踪控制

杜锦华, 梁得亮

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 以波浪能转换系统中功率变换器为载体, 根据互感耦合式直线开关磁阻发电机(LSRMC)的结构特点及运行原理, 以最大波能转换为目标, 采用在线计算最佳开通关断位置的方法, 研究了 LSRMC 的最佳效率跟踪控制, 并通过有限元分析和实验结果相互比较的方法对控制效果进行了验证. 结果表明, 与开关位置未优化的情况相比, 采用最佳功率跟踪控制的电机获得的效率更高, 并改善了系统的运行稳定性. 此控制方法简单、易实现, 为 LSRMC 在波浪能发电工程应用领域的进一步发展奠定了基础.

关键词: 直线开关磁阻发电机; 互感耦合; 波浪能发电; 最佳效率跟踪

中图分类号: TM352; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0052-06

Optimal Efficiency Tracking Control for Mutually Coupled Switched Reluctance Generators in Direct-Driven Wave Energy Conversion

DU Jinhua, LIANG Deliang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For an associated power converter in wave energy conversion system, taking the maximum energy from the ocean wave as the objective, the optimal efficiency tracking control of mutually coupled linear switched reluctance generators (LSRMCs) is investigated by online determination of optimal turn-on and turn-off positions. The comparisons between finite element analysis and the experiments validate the presented control scheme, which suggests that the LSRMC with optimal efficiency tracking control is endowed with higher efficiency than that without optimization, and improves the operational stability with easy operation.

Keywords: linear switched reluctance generator; mutual coupling; wave energy conversion; optimal efficiency tracking

在海洋能源中, 波浪能是最容易被直接利用的机械能, 也是当今海洋能源开发的重点研究领域. 近年来, 永磁电机是波浪能转化装置的热点研究对象, 由于永磁材料价格较高和在海水中易腐蚀, 促使我们不断寻找和研究其他的新型电机. 互感耦合式直线开关磁阻发电机(LSRMC)结合了传统的旋转开关磁阻电机结构简单、可靠性好、成本低, 以及传统

直线电机无中间环节直接驱动直线运动台的优点, 使它在低速大推力的海洋环境中作为波浪能转换装置已经越来越受到人们的关注^[1-3].

目前, 与互感耦合式直线开关磁阻电机工作原理相似的互感耦合式旋转开关磁阻电机, 从分析模型、等效磁路模型到多种功率变换器拓扑和控制策略等方面已经有了一些初步的研究, 虽然这些研究

收稿日期: 2011-07-05. 作者简介: 杜锦华(1984—), 女, 博士生; 梁得亮(通信作者), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877058).

网络出版时间: 2011-11-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20111117.1744.002.html>

都是基于电动机的应用,却为 LSRMC 的研究提供了可借鉴的分析思路与研究手段.文献[4]介绍了一台 7.5 kW、8/6 传统旋转开关磁阻发电机的控制系统;文献[5]介绍了通过计算一台 0.8 kW、8/6 传统选择开关磁阻发电机的效率和转矩脉动之间的权衡系数得到最佳性能指标的方法;文献[6]研究了旋转开关磁阻发电机的最大能量传输的优化控制方法.然而,上述文献中的研究对象均为旋转电机,没有考虑到直线电机的典型特征所带来的影响,如磁路截断而引起的边端效应、法向拉力和电机的往复运动等[7].

为此,本文以 LSRMC 为研究对象,根据负载的电气要求,采用在线控制的方法优化发电性能.与之前的研究工作相比,本文工作具有以下几方面的特点:①所研究的 LSRMC 应用于低速大推力的直驱式波浪能发电装置;②每个周期内两相激励和发电状态轮流出现,并且要求控制策略和功率拓扑结构与不间断的往复直线运动相适应;③以绝缘栅双极晶体管(IGBT)的开通关断位置作为控制变量来优化发电机的发电性能.

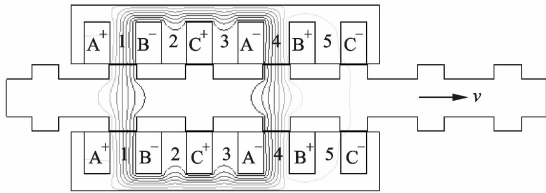
1 LSRMC 的运行原理和数学模型

1.1 运行原理

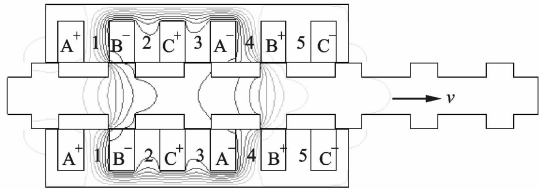
本文所提到的 LSRMC 与传统的 6/4 旋转开关磁阻电机运行原理相似.它由一个双边的初级和一个运动的次级组成,其中次级被固定于导轨的 4 个滑块上,而初级上的三相线圈以全距绕组的形式分布在槽中.波能发电系统示意图如图 1 所示.

LSRMC 与传统开关磁阻电机一样,遵循“磁阻

最小”的运行原理,即磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合.如图 2a 所示,当两个次级齿和 1、4 两个初级齿对齐时,其他次级齿均无对齐的情况,因此在励磁阶段电动机克服电磁力拖动次级运动时,机械能以磁场能的形式存储在了电机中,如图 2b 所示.在发电阶段,通过开通关断 IGBT,将存储的磁场能转换为电能输出给负载,并且通过合理控制励磁和发电阶段,电能将稳定输出.



(a)初、次级齿对齐位置



(b)初、次级齿不对齐位置

图 2 LSRMC 在典型位置的磁场分布情况

从文献[1]中的理论分析和仿真可以看出,LSRMC 自感随时间的变化较互感随时间的变化缓慢得多.因此,不同于传统的开关磁阻电机的发电阶段发生在自感下降阶段[8-9],互感耦合式开关磁阻电机的发电阶段在单极性电流励磁模式中发生在互感下降阶段,而在双极性电流励磁模式中发生在互感上升阶段.本文只讨论图 3 所示的单极性电流励磁模式,因此发电机所需的功率变换器拓扑可以采

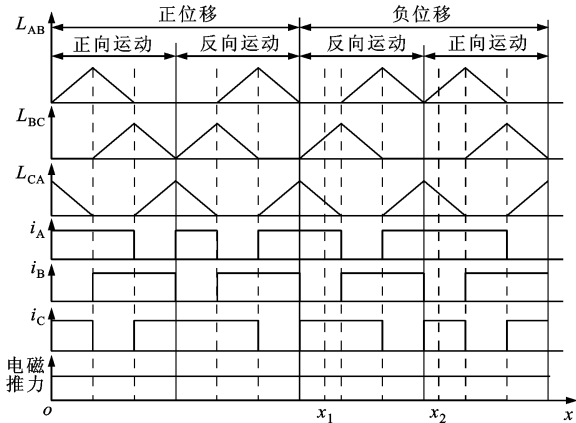


图 3 LSRMC 的典型发电波形

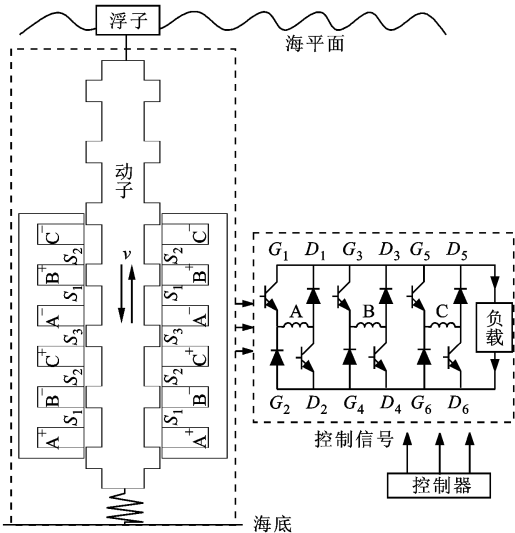


图 1 波能直驱式 LSRMC 发电系统示意图

用功率开关和每相绕组串联的方式来避免 IGBT 误开通导致击穿的问题^[10]. 本系统采用图 1 所示的半桥拓扑结构, 开通 G_{1-4} , 绕组 A 和 B 进入励磁阶段, 机械能以磁场能的形式存储在电机中, 在 G_{1-4} 关断后, 绕组电流不能突变, 而是通过续流二极管续流发电, 直到电流耗尽. 为了提高发电效率, 对相电流不控制, 而是通过控制开通关断位置来优化发电性能, 即按照负载要求, 结合次级运动速度和母线电压进行磁通控制.

1.2 数学模型

采用 LSRMC 的波浪能转换装置(如图 1 所示)起主要作用的是随次级运动位置变化的磁通量, 与发电量息息相关的反向电磁力为^[1]

$$F_e = i_A i_B \frac{dL_{AB}}{dx} + i_B i_C \frac{dL_{BC}}{dx} + i_C i_A \frac{dL_{CA}}{dx} \quad (1)$$

式中: L_{AB} 、 L_{BC} 、 L_{CA} 是三相绕组间的互感; i_A 、 i_B 、 i_C 是三相绕组相电流; x 是初级和次级的相对位移.

为了研究系统的动态性能, 根据基尔霍夫定律和牛顿方程, 电压平衡方程和机械方程可表示如下

$$\pm u_n = r_n i_n + \frac{d}{dt} \lambda_n \quad (2)$$

$$m \ddot{x} + R \dot{x} + Kx = F_e + F_s \quad (3)$$

式中: u 是端电压, 负值表示励磁阶段, 正值表示发电阶段; r 为绕组相电阻; λ 是磁链; i 是相电流; 下标 n 分别代表三相 A、B、C. 运动部分的质量 m 、波浪力 F_s 、系统的摩擦系数 R 和机械阻尼 K 都可以直接测量得到.

在发电阶段, $\frac{d}{dt} \lambda_n > u_n$ 为必要条件, 这与次级的运动速度有关. 为了清楚地阐述发电过程, 这里以图 3、图 4 为例, 说明 $x_1 \sim x_2$ 时间段的能量转化过程.

区间 1 ($x_{on1} \sim x_{off1}$): x_{on1} 时刻开通 G_{3-6} , 绕组 B

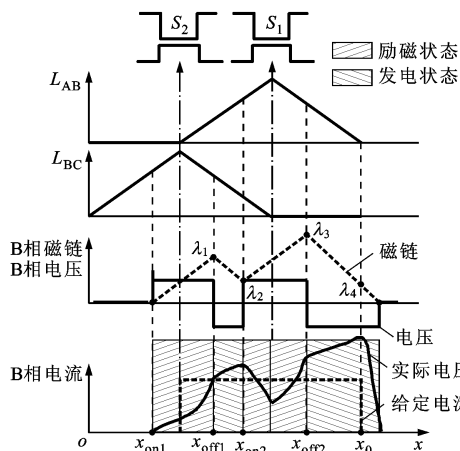


图 4 励磁和发电阶段的典型参数波形

和 C 进入励磁阶段, 由电动机提供的机械能建立磁场. 根据式(2), i_B 从 x_{on1} 时刻开始增加.

区间 2 ($x_{off1} \sim x_{on2}$): x_{off1} 时刻关断所有开关, 存储的磁场能通过绕组 B 和 C 转化为电能供给负载, i_B 和 i_C 通过 D_{3-6} 续流, 且不断增大.

区间 3 ($x_{on2} \sim x_{off2}$): x_{on2} 时刻开通 G_{1-4} , 绕组 A 和 B 进入励磁阶段, 此时 i_B 开始下降, 直到进入 L_{AB} 下降区域, i_B 重新增大.

区间 4 ($x_{off2} \sim x_2$): x_{off2} 时刻关断所有开关, 存储的磁场能通过绕组 A 和 B 转化为电能供给负载, i_A 和 i_B 通过 D_{1-4} 续流, 且 i_B 增加到最大后降至 0.

同理, 在其他区间上述过程均适用.

2 开通关断位置的计算方法

2.1 开关关断位置的优化方法

为了更清楚地解释优化位置的计算方法, 以图 4 所示的区间 $x_1 \sim x_2$ 和 B 相绕组为例. 在前面提到的区间 1 励磁阶段时, B 相磁链从 0 开始建立至第 1 个峰值 λ_1 , 假设次级匀速运动, 且运动速度为 v , 则磁链的第 1 个峰值就可以按式(2)得出

$$\lambda_1 = \frac{1}{v} \int_{x_{on1}}^{x_{off1}} (V_{dc} - r_B i_B) dx \quad (4)$$

式中: V_{dc} 为母线电压.

下一个励磁阶段区间 3, 磁链从前一个波谷 λ_2 增加到第 2 个峰值 λ_3 , 在匀速运动的假设下, 磁链随位置的变化在发电阶段与励磁阶段相等, 因此可得

$$\lambda_2 = \lambda_1 - \lambda_1 \frac{x_{on2} - x_{off1}}{x_{off1} - x_{on1}} = \lambda_1 - \lambda_1 \frac{x_{on1} + \beta - x_{off1}}{x_{off1} - x_{on1}} \quad (5)$$

$$\lambda_3 = \lambda_2 + \lambda_1 \frac{x_{off2} - x_{on2}}{x_{off1} - x_{on1}} =$$

$$\lambda_2 + \lambda_1 \frac{x_{off1} + \beta - x_{on1} - \beta}{x_{off1} - x_{on1}} = \lambda_2 + \lambda_1 \quad (6)$$

式中: β 为次级齿宽和初级齿宽中的较小值. 相电流最大的 x_0 时刻, 磁链 λ_4 可以推导为

$$\lambda_4 = \lambda_3 - \lambda_1 \frac{x_0 - x_{off2}}{x_{off1} - x_{on1}} = \lambda_3 - \lambda_1 \frac{x_0 - x_{off1} - \beta}{x_{off1} - x_{on1}} \quad (7)$$

式中: x_0 等于运动行程.

由图 4 所示, 其比例系数为 c , 磁链 λ_4 和 λ_3 之间存在如下线性关系

$$\lambda_4 = c \lambda_3 \quad (8)$$

本文以发电机效率为性能的评价指标, 必然存在一个最佳比例系数 c_{opt} 与最佳性能相对应. 将式

(4)~式(7)代入式(8)中,可得到最优开通关断位置如下

$$\left. \begin{aligned} x_{on1_opt} &= (3c_{opt} - 4) \frac{v \lambda_{1_opt}}{V_{dc}} - c_{opt} \beta + x_0 \\ x_{on2_opt} &= x_{on1_opt} + \beta \\ x_{off1_opt} &= \frac{v \lambda_{1_opt}}{V_{dc}} + x_{on1_opt} \\ x_{off2_opt} &= x_{off1_opt} + \beta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 λ_{1_opt} 由母线电压 V_{dc} 通过闭环控制得到.

2.2 最佳比例系数 c_{opt} 的计算

由式(9)可知,为了计算最佳开通关断位置,需要知道最大发电效率时的最佳比例系数 c_{opt} . 在本文所提出的波浪能转换装置中,其效率可以表示为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{dc} I_{gen}}{Fv + V_{dc} I_{mag}} \quad (10)$$

式中: F 为波浪力的平均值; I_{mag} 和 I_{gen} 为励磁电流和发电电流的平均值. 在实验中,由于实验条件的限制,采用电动机来模拟波浪力,因此 F 可以通过力传感器测得,而 I_{mag} 和 I_{gen} 可以通过积分器和电流传感器测得.

在进行发电运行之前,最佳比例系数 c_{opt} 需要在实验或仿真中通过固定开通位置 x_{on1} 、不断调整关断位置 x_{off1} 直到达到最大效率的方法来得到,其计算方法如下

$$c_{opt} = \frac{4x_{off1_opt} - 3x_{on1_opt} - x_0}{3(x_{off1_opt} - x_{on1_opt}) - \beta} \quad (11)$$

式中: x_{on1_opt} 和 x_{off1_opt} 分别为最大效率时的开通和关断位置.

本文所采用的 LSRMC 主要结构参数如表 1 所示. 根据前面提到的计算方法,首先搭建了 Matlab 数学模型,其系统流程框图如图 5 所示. 经过仿真,可以得到比例系数 c 和效率的关系如图 6 所示. 从图 6 可以看出,当 $c=0.85$ 时效率最大,且与开通位置 x_{on1} 无关,因此可得到最佳比例系数 c_{opt} 为 0.85.

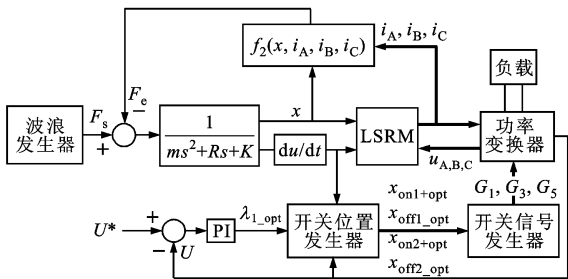


图 5 系统流程框图

表 1 互感耦合式直线开关磁阻发电机的主要参数

定子齿宽/mm	35.5
定子齿高/mm	19.0
定子槽宽/mm	64.25
定子轭高/mm	24.5
定子齿宽/mm	33.0
定子齿高/mm	54.0
定子槽宽/mm	33.5
定子轭高/mm	21.5
有效长度/mm	190.5
气隙/mm	1.5

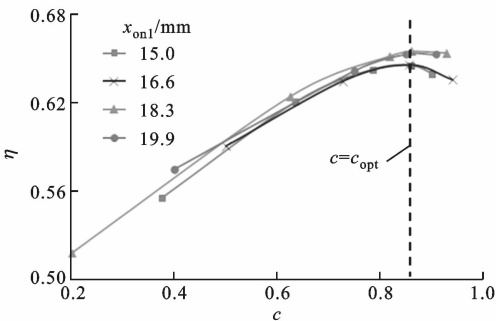


图 6 最佳比例系数的确定

3 仿真结果和实验验证

为了验证数学模型的准确性,利用 Maxwell/Simploer 的有限元仿真软件搭建了有限元模型,如图 7 所示.

图 8 给出了由有限元仿真得到的 LSRMC 非线性互感模型,可以看出其互感随时间的变化率是传统开关磁阻电机自感随时间变化率的 2 倍^[1],这样互感对发电阶段的贡献每个周期至少为 2/3,提高了磁路的利用率,也是 LSRMC 较传统开关磁阻电机高效的主要原因.

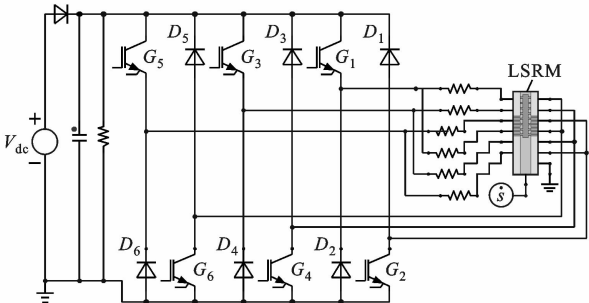


图 7 有限元仿真模型

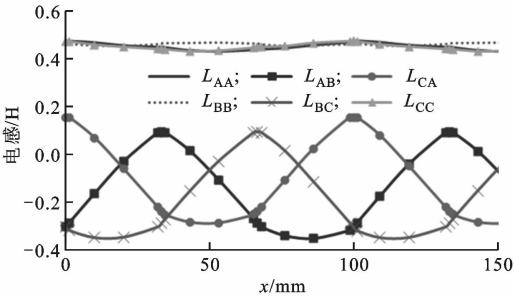
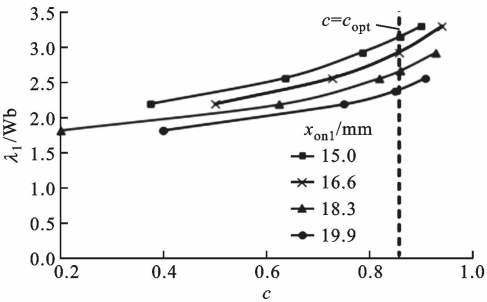
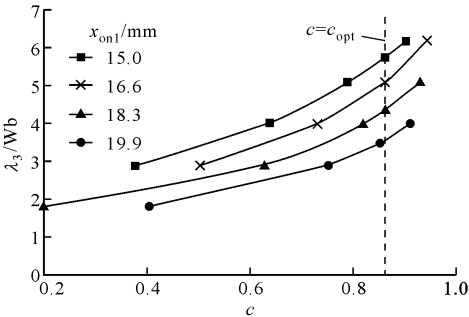


图 8 电感波形的有限元仿真结果

为了验证理论推导,对数学模型和有限元模型的仿真结果进行了一些比较.图 9 所示为数值分析中磁链第 1 峰值 λ_1 和第 2 峰值 λ_3 随比例系数 c 在不同开通位置 x_{on1} 的变化情况,可以看出,随着比例系数的增加,磁链峰值的增加趋势基本一致.由于 Simploer 和 Maxwell 联合仿真的耗时较长,文中为了给出有限元仿真的对比结果,固定 c 为最佳比例系数时,计算了磁链第 1 峰值 λ_1 ,第 2 峰值 λ_3 ,开通位置 x_{on2} ,关断位置 x_{off1} 、 x_{off2} 在不同开通位置 x_{on1} 时的变化情况,如图 10 所示.结合图 9 和图 10,得出了在最佳效率点时各参数的数值分析结果和有限元仿真结果的比较情况,如图 11 所示.通过图 11 的比较可以看出,数值分析和有限元分析的结果吻合情况较好,证明了在最佳功率点时,数学模型的有效性和正确性,可以成为替代复杂而且耗时的有限元分



(a)第 1 峰值



(b)第 2 峰值

图 9 磁链峰值的数值仿真结果

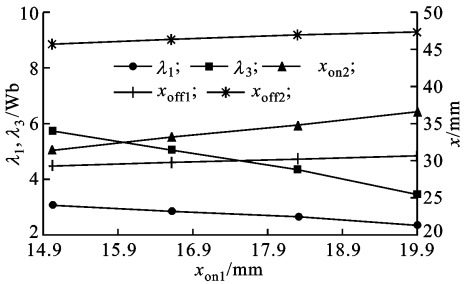


图 10 最佳效率跟踪控制下的有限元仿真结果

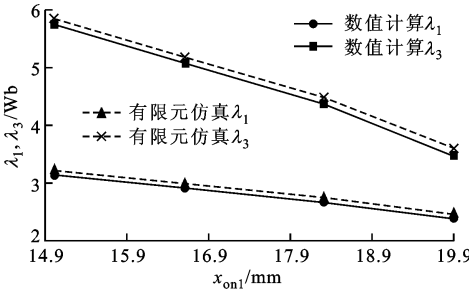


图 11 最佳效率跟踪控制下的数值仿真和有限元仿真磁链峰值比较

析的另一种解决方法.

另外,为研究最佳效率点时的电流情况,还进行了实验验证.采用的发电机结构参数同仿真中采用的一样,实验系统如图 12 所示,交流电机通过曲柄滑杆结构带动互感耦合直线开关磁阻发电机运动,模拟波浪能,并供电给阻性负载.实验电流波形如图 13 所示,并与仿真结果相比较.可以看出,在行程的中间部分,实验和仿真结果吻合较好,而在两端差异明显,主要原因是在仿真中未考虑到运动到两端的电机振动情况.同时还可以看出,采用了最佳控制后,在输入功率和负载电压一样的情况下,相电流的平均值增大了,说明采用最佳功率跟踪控制方法使效率得到了提高,且两端的振动问题得到了改善.

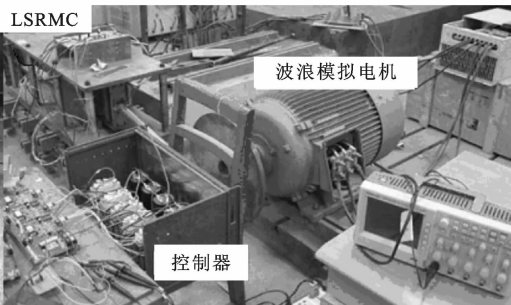


图 12 实验平台

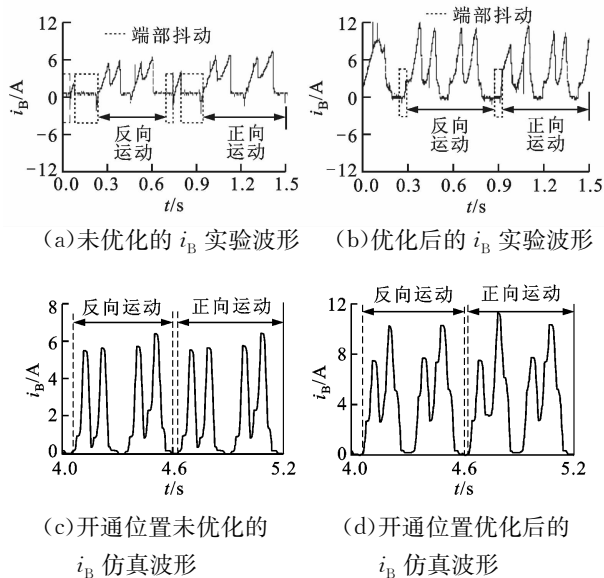


图13 B相电流实验波形和仿真波形的比较

4 结 论

本文研究了采用不对称半桥拓扑结构功率变换器的LSRMC最佳功率跟踪控制的实现方法. 此种方法根据输出电压的要求, 控制IGBT的开通关断位置, 以实现最佳效率跟踪的控制目标. 最后, 采用有限元仿真和实验方法共同验证了文中所提出的在线计算控制策略的实用性和有效性. 实验结果表明: 与开关位置未优化的情况相比, 采用最佳功率跟踪控制的电机获得的效率更大, 并在一定程度上改善了系统运行的稳定性, 优化方法简单、容易实现, 具有较好的应用价值.

参考文献:

- [1] DU Jinhua, LIANG Deliang, XU Longya, et al. Modeling of a linear switched reluctance machine and drive for wave energy conversion using matrix and tensor approach[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 1334-1337.
- [2] BHIWAPURKAR N, BREKKEN T A, MOHAN N. Torque ripple optimization of switched reluctance motor using two-phase model and optimization search techniques[C]//Proceeding of 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 1-6.
- [3] GHONEIM W A M, FLETCHER J E, WILLIAMS B W. Linear analysis of two-, three- and four-phase switched reluctance machines with variable pitched winding configurations[J]. IEE Proceedings: Electric

Power Applications, 2003, 150(3): 319-343.

- [4] CARDENAS R, RAY W F, ASHER G M. Switched reluctance generators for wind energy applications[C]//Proceeding of 26th IEEE Power Electronics Specialists Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1995: 559-564.
- [5] CHRISTOS M, IORDANIS K. Optimizing performance in current-controlled switched reluctance generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 556-565.
- [6] IORDANIS K, CHRISTOS M. Optimal efficiency control of switched reluctance generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1062-1072.
- [7] NASAR S A, BOLDEA I. Linear electric motors: theory, design, and practical applications[M]. Englewood Cliffs, NJ, USA; Prentice-Hall, 1987: 85-120.
- [8] 郑洪涛. 开关磁阻电动机驱动系统建模及其控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [9] 程竹平. 开关磁阻起动发电系统控制策略的研究与实现[D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [10] KRISHNAN R. Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, design and applications[M]. Boca Raton, FL, USA; CRC Press, 2001: 123-154.

[本刊相关文献链接]

- 永磁同步电机的改进扩展卡尔曼滤波测速算法. 2011, 45(10): 59-64.
- 求解大型电力系统机电振荡模态的逆幂方法. 2010, 44(10): 93-98.
- 具有模态解耦构型的纵弯直线超声电机. 2010, 44(8): 101-105.
- 一种无速度传感器的双馈风力发电机滞环矢量控制策略. 2010, 44(6): 109-113.
- 互感耦合开关磁阻电机的等效磁路模型与有限元分析. 2010, 44(4): 71-75.
- 用非线性电阻模拟变压器损耗进行铁磁谐振过电压研究. 2009, 43(10): 109-113.
- 交变励磁三维遥测定位方法研究. 2009, 43(6): 717-721.
- 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析. 2008, 42(4): 481-486.
- 基于励磁电感参数识别的变压器励磁涌流判别方法. 2007, 41(10): 1214-1218.
- 动磁直线电机驱动压缩机的建模与仿真. 2007, 41(7): 820-824.
- 支持向量机在电力变压器故障诊断中的应用. 2007, 41(6): 722-726.

(编辑 杜秀杰)