

DOI: 10.7667/PSPC161973

12 kV 真空断路器永磁直线电机操动机构特性分析

郭福柱¹, 刘晓明^{1,2}, 朱高嘉¹, 张迎康¹, 张智超¹

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津 300387)

摘要: 为解决 12 kV 真空断路器(Vacuum Circuit Breaker, VCB)传统操动机构和旋转电机操动机构结构复杂、可靠性低、动作分散性大以及有槽直线电机操动机构定位力引起推力脉动、振动、噪声及速度控制退化等而导致其难以精确分、合闸的问题, 提出无槽圆筒形永磁直线同步电机操动机构。根据 12 kV 真空断路器分、合闸特性要求, 对无槽圆筒形永磁直线同步电机(Slotless Tubular Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, STPMLSM)的结构和参数进行设计, 推导出其数学模型。利用有限元法对该电机操动机构的静、动态特性进行仿真分析, 得到启动过程中电磁推力与时间的关系, 分合闸过程中断路器动触头行程与时间、速度与时间的关系。结果表明: 所设计的电机操动机构结构参数能够满足断路器分合闸特性要求, 且推力波动得到有效抑制, 为各电压等级断路器采用此类电机操动机构提供可靠依据。

关键词: 真空断路器; 操动机构; 无槽圆筒形永磁直线同步电机; 有限元法; 特性分析

Characteristic analysis of permanent magnet linear motor operating mechanism for 12 kV vacuum circuit breaker

GUO Fuzhu¹, LIU Xiaoming^{1,2}, ZHU Gaojia¹, ZHANG Yingkang¹, ZHANG Zhichao¹

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The traditional operating mechanism and the rotary motor operating mechanism take on complex structure, low reliability and large dispersion. The detent force of slot linear motor operating mechanism brings thrust pulsation, motor vibration and degradation of speed control. These factors lead to imprecise opening and closing of 12 kV Vacuum Circuit Breaker (VCB). In order to solve problems mentioned above, the Slotless Tubular Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (STPMLSM) operation mechanism is proposed. According to the opening and closing characteristics, the structure and the parameters of STPMLSM are designed, with its mathematical model derived. The static and dynamic characteristics of the motor are simulated and analyzed by finite element method. The relationship between the motor electromagnetic force and time is obtained during the starting process, and the relationships among the movable contact travel, the speed and time are acquired. The results show that the motor structure parameters which are designed in this paper can meet the requirements of the circuit breaker switching characteristics, effectively suppress the thrust pulsation, and provide reliable foundations for the motor operating mechanism used in various voltage levels.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377106 and No. 51337001).

Key words: vacuum circuit breaker (VCB); operating mechanism; slotless tubular permanent magnet linear synchronous motor (STPMLSM); finite element method; characteristic analysis

0 引言

能源危机、环境污染和生态恶化已是人类面临的三大主要问题。而电能具有大规模集中生产、远

距离经济传输和智能化控制的特点, 是人类生产和生活的主要能源, 也是重要的清洁能源。大力发展可再生能源虽然可以解决能源与环境之间的矛盾^[1], 但新能源的接入使得配电网拓扑结构发生改变, 这对配电网保护控制和运行管理提出挑战, 也对断路器开关电器性能及功能等提出新的要求^[2]。

电力工业是保证国民经济发展的基础产

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377106); 国家自然科学基金重点项目(51337001)

业, 安全可靠稳定运行的电力系统是国民经济持续发展的根本保证, 电力系统中自身设备的原因和外部因素的干扰经常引起电网故障^[3]。断路器是最重要的电力设备之一, 在电力系统中承担着控制和保护设备及线路的双重任务^[4]。在 40.5 kV 及以下电压等级的众多开关设备中, 真空断路器 (Vacuum Circuit Breaker, VCB) 具有无可比拟的优势被广泛使用^[5-6]。而在真空断路器机构的各组成部件中, 操动机构具有控制断路器进行分、合闸操作的作用, 是其重要的组成部分。断路器能否按照预设的要求精确完成分、合闸操作, 操动机构的可靠性和耐用性将直接影响着对断路器工作性能与质量的评判^[7-8]。断路器在分合闸过程中, 灭弧室内 SF₆ 气体压力异常, 操作机构的液压、弹簧压力异常等, 都可能引起断路器出现闭锁分合闸, 只能靠失灵保护或后备保护动作来隔离故障, 会增大系统的失稳风险^[9]。根据现有资料统计表明, 操作事故中断路器机械故障(包括操动机构和控制回路)大约占全部故障的 70%~80%^[10]。

目前, 真空断路器通常采用弹簧、电磁和永磁作为其操动机构, 而这些机构大都结构相对复杂、可靠性较低、可控性差、动作分散性大, 在一定程度上导致断路器不能够精确分、合闸。因此, 为适应真空断路器需快速响应、短动态时间的特点, 满足智能电网建设的需要, 对真空断路器传统操动机构进行改进或重新设计新型操动机构可以克服拒动、误动或机械卡涩带来的一系列问题。

近年来, 用于断路器的新型电机操动机构备受关注^[11], 其具有较高的快速响应能力, 可满足断路器分、合闸特性要求, 且可精确控制断路器的开断和关合时间, 可靠性高, 能够加快实现真空断路器的智能化操作。ABB 公司研制出基于瓷柱式、罐式及发电机等的结构简单和工作可靠性高的电机直接控制断路器的操动机构。文献[8]对不同转子结构的永磁电机操动机构和控制系统进行了研究, 提出多槽双层表贴埋入式定子永磁电机和控制装置设计方案。文献[12]提出基于永磁无刷直流电机驱动 SF₆ 断路器的方法, 并给出最优控制策略。文献[13-14]建立永磁同步电机的仿真模型, 利用矢量控制算法实现对断路器行程特性的控制。文献[15]采用基于最优二次型学习算法的单神经元 PID 速度控制器控制策略对旋转式永磁直线同步电机操动机构进行控制研究。

本文根据 12 kV 真空断路器分、合闸特性要求, 将无槽圆筒形永磁直线同步电机应用于该断路器操动机构, 对其进行结构和参数设计, 推导出动态数

学模型, 建立仿真模型, 利用有限元法对 STPMLSM 操动机构的静、动态特性进行仿真分析。

1 结构与参数

1.1 真空断路器及 STPMLSM 结构

从结构上来讲, 真空断路器由开断部分(触头系统、导电部件和真空灭弧室)、操动与传动部分、绝缘部分组成, 将 STPMLSM 应用于该 12 kV 真空断路器操动机构, 其电机次级通过绝缘拉杆、波纹管与灭弧室内的动触头相连接, 如图 1 所示。

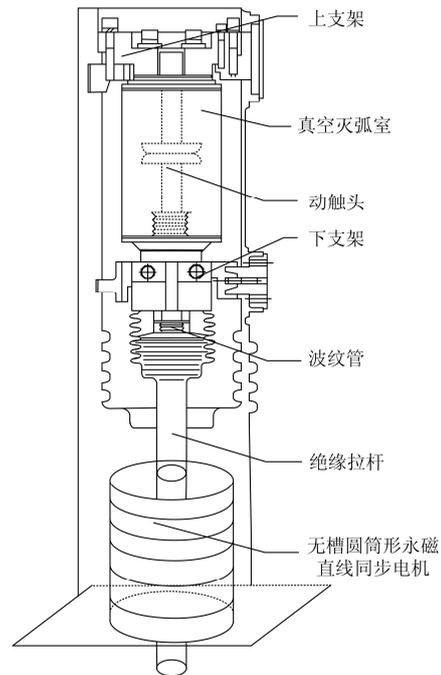


图 1 真空断路器结构示意图(直线电机操动机构)

Fig. 1 Structure of VCB (linear motor operating mechanism)

用于 12 kV 真空断路器操动机构的 STPMLSM 纵向剖面结构示意图如图 2 所示。

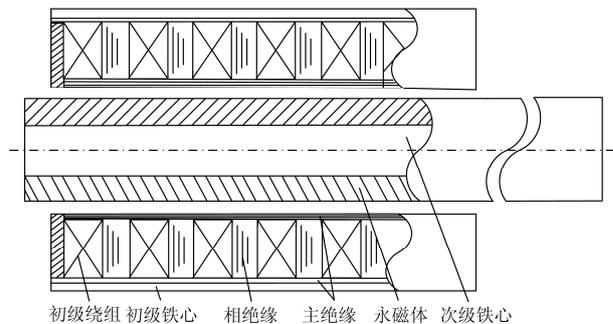


图 2 无槽圆筒形永磁直线电机结构图

Fig. 2 Structure of STPMLSM

STPMLSM 兼有无槽永磁电机与圆筒形永磁直线同步电机二者的优点^[16], 所设计的 STPMLSM 初

级结构如图 3 所示。

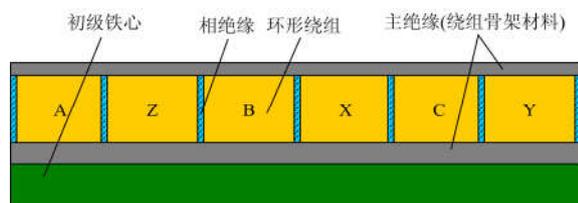


图 3 无槽圆筒形永磁直线电机初级结构图

Fig. 3 Primary structure diagram of STPMLSM

初级绕组内圆为强度较高的绝缘骨架材料，每两个环形绕组之间是相间绝缘，每相由若干个集中环形绕组线圈组成，环形绕组与初级铁心之间为主绝缘。为减小绕组长度，降低绕组电阻值，设计过程中绕组排列尽可能规整，这样有利于提高槽满率，而且可减小绕组径向厚度，从而减小物理气隙长度，降低主磁路磁阻，进一步提高无槽圆筒形永磁直线电机操动机构的磁负荷。

与传统绕组结构相比较，环形绕组结构端部短，导线嵌放简单，并且其按照一定相序排列，互不搭接，镶嵌于初级铁心内筒并用环氧树脂固化封装，每个环形绕组及其绝缘所在区域形成一个虚槽，单个虚槽绕组结构如图 4 所示。

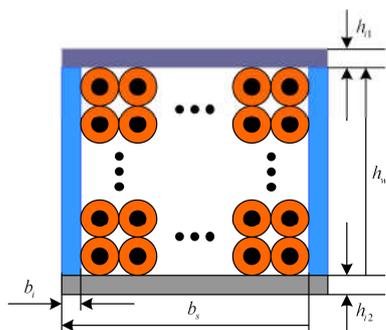


图 4 单个虚槽绝缘结构图

Fig. 4 Insulation structure for single virtual slot

1.2 STPMLSM 操动机构性能与结构参数

断路器通过动静触头之间的分、合来实现电路的关断和接通。断路器触头的分、合是通过 STPMLSM 操动机构来实现的。在开断过程中，要求动触头具有很高的刚分速度，以保证快速熄弧的能力。在分闸过程结束时，应减小动触头的速度以削弱对断路器的冲击，避免引起不必要的机械振动和噪声，延长断路器的寿命。在合闸过程中，STPMLSM 操动机构必须能够提供克服触头弹簧反力、重力等动能。

12 kV 真空断路器灭弧室主要技术参数如表 1 所示。

表 1 12 kV 真空断路器灭弧室主要技术参数

Table 1 Main technical parameter for 12 kV VCB

arc-extinguishing chamber	
名称	数值
额定电流/A	630
额定开断电流/kA	20
触头弹簧力预压力/N	2200
触头弹簧力/N	3000
灭弧室自闭力/N	85±50
触头开距/mm	11±1
接触行程/mm	3±1
合闸时间/ms	35~65
分闸时间/ms	20~50
平均合闸速度/(m/s)	0.7~1.2
平均分闸速度/(m/s)	1.0~1.9

12 kV 真空断路器在分、合闸的过程中，所受力主要包括灭弧室自闭力、动触头弹簧力、重力、波纹管力以及摩擦阻力等，灭弧室自闭力主要是由于真空灭弧室内、外部气压差产生，近似为恒值。在真空断路器各机构在动触头的运动过程中，这些力有时是动力，有时是反力。

12 kV 真空断路器运动系统总重力为

$$Mg = m_1g + m_2g + m_3g = 210 \text{ N} \quad (1)$$

式中： M 为运动系统总质量； m_1 为动触头质量； m_2 为绝缘拉杆质量； m_3 为电机次级质量。

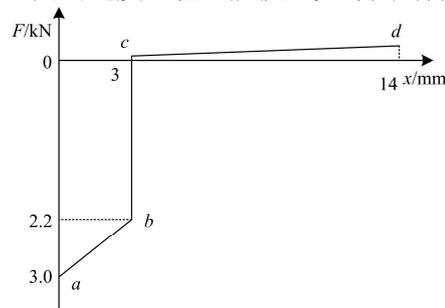
忽略波纹管力，真空断路器系统所受合力为

$$F = F_c + F_e + Mg + F_p + f \quad (2)$$

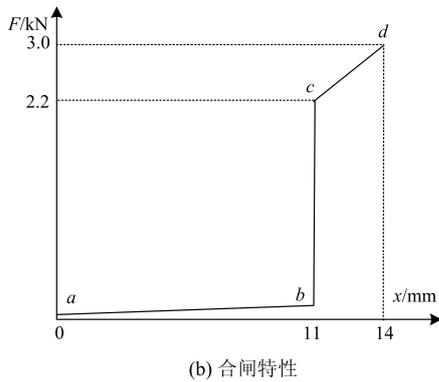
式中： F_c 为永磁直线电机电磁推力； F_e 为断路器触头弹簧力； Mg 为重力； F_p 为灭弧室自闭力； f 为摩擦阻力。

12 kV 真空断路器分、合闸负载特性如图 5 所示。

由图 5 (a)、(b)可知，在 12 kV 真空断路器的分、合闸运动过程中，断路器动触头接触行程阶段(0~3 mm)主要动力是无槽圆筒形永磁直线同步电机操动机构的电磁推力、触头弹簧力和运动系统所受的重力，阻力为各部件之间的摩擦力和灭弧室自闭力；动、静触头接触行程结束阶段(3~14 mm)，绝缘拉杆与连杆获得一定的速度，在此阶段触头弹簧对分闸运动



(a) 分闸特性



(b) 合闸特性
图 5 12 kV 真空断路器分、合闸负载特性
Fig. 5 Load characteristics of opening and closing for 12 kV VCB

不起作用，动触头、绝缘拉杆及连杆在永磁直线电机操动机构电磁推力的作用下一同运动，到达分闸位置，断路器分闸过程结束，在此过程中，动力为永磁直线电机电磁推力和重力，阻力包含摩擦力和灭弧室自闭力；合闸运动过程中，动、静触头刚合阶段(0~11 mm)，主要动力为电机电磁推力和灭弧室自闭力，阻力为运动系统重力及各部件之间的摩擦力；动、静触头接触行程阶段(11~14 mm)主要动力为电磁推力、灭弧室自闭力，阻力为触头弹簧力、运动系统所受的重力及各部件之间的摩擦力。根据断路器分、合闸运动特性要求，进行运动系统受力计算，可得 STPMLSM 操动机构主要性能参数如表 2 所示。

表 2 无槽圆筒形永磁直线同步电机操动机构主要性能参数
Table 2 Main performance parameters of STPMLSM operating mechanism

名称	数值	名称	数值
额定相电压 U_N/V	220	额定电流 I_N/A	6.605
初级绕组接法	Y	相数	3
电磁推力 F_c/N	3125	电源频率 f	50
同步速 $v_s/(m/s)$	1.3	输入功率 P/kW	4.0625

根据 12 kV 真空断路器分合闸速度、力、分合闸时间、平均分合闸速度的具体要求，设计能够满足断路器精确分合闸的 STPMLSM 操动机构，其主要尺寸如表 3 所示。

2 静态特性分析

静态特性是指在 STPMLSM 绕组中通以恒定的电流，初级固定时的性能参数，主要包括气隙磁场、定位力、感应电动势与磁链特性曲线。根据所设计的用于 12 kV 真空断路器操动机构的 STPMLSM 主要尺寸，建立其有槽/无槽 STPMLSM 操动机构有限元模型如图 6 所示。

表 3 无槽圆筒形永磁直线同步电机操动机构主要尺寸
Table 3 Main dimension of STPMLSM operating mechanism

名称	数值	名称	数值
初级外径 D_0/mm	90.5	初级内径 D_1/mm	53
次级外径 D_2/mm	32.5	绕组厚度 h_w/mm	8
次级长度 L_1/cm	56	机械气隙长度 δ/mm	2
初级长度 L_0/cm	44.5	物理气隙长度 g/mm	10
初级虚拟槽数 Q_1	12	永磁体厚度 h_p/mm	18.5
极数 $2p$	11	每极每相槽数 q	1
每槽导体数 N_s	50	极距 τ/mm	50.9

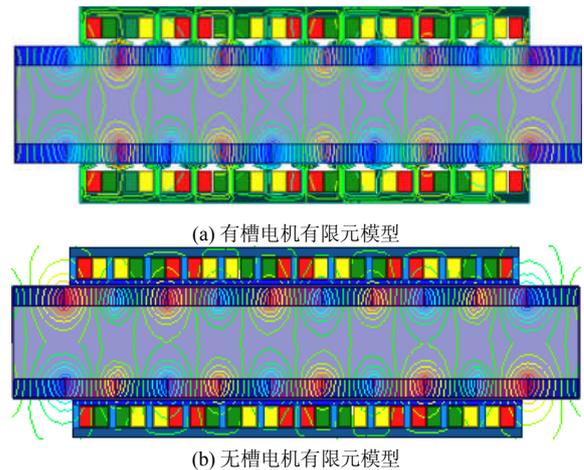


图 6 有槽与无槽圆筒形永磁直线同步电机操动机构有限元模型
Fig. 6 Finite element model of slot and slotless STPMLSM operating mechanism

定位力是指在断电或零电流状态下，由于初级齿槽的存在及磁路的开断，引起初级铁心磁阻的变化，次级永磁体与初级齿槽及其边端在相对运动的过程中产生的相互作用力，主要由齿槽分量和端部分量两部分组成，空载运行时的定位力、感应电动势、磁链变化曲线如图 7—图 9 所示。

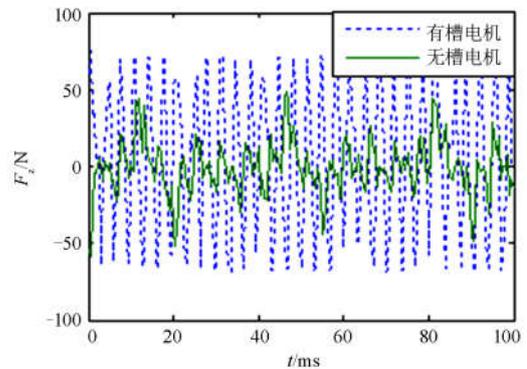


图 7 有槽与无槽圆筒形永磁直线同步电机定位力
Fig. 7 Detent force of slot and slotless TPMLSM

由图 7 可知, 采用无槽结构的 TPMLSM 操动机构可减小定位力, 其正向峰值为 50 N, 反向峰值为 55 N, 比有槽结构磁阻力峰值要小, 定位力在电磁推力中所占比重很小, 推力波动可得到有效抑制。

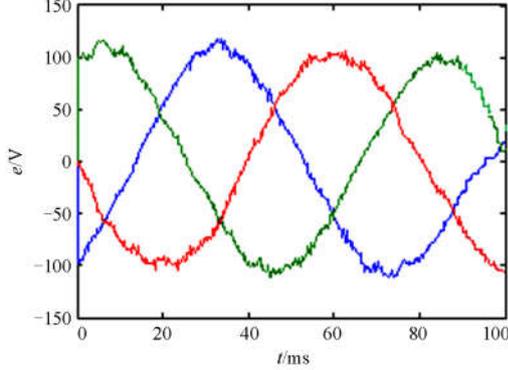


图 8 无槽永磁直线电机操动机构三相感应电动势

Fig. 8 Three phase induction electromotive force slotless TPMLSM operation mechanism

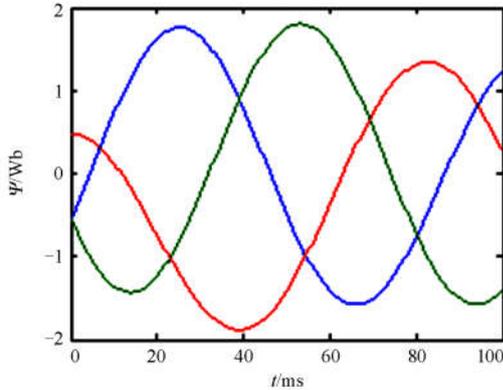


图 9 无槽永磁直线电机操动机构三相磁链

Fig. 9 Three phase flux linkage of slotless TPMLSM operation mechanism

由图 8、图 9 可得, 三相感应电动势和磁链波形接近正弦, 三相感应电动势正、反向峰值接近相等, C 相磁链正、反向峰值与 A、B 两相峰值相差 0.3 Wb, 对 STPMLSM 操动机构开断 12 kV 真空断路器的性能影响比较小, 且利于产生平稳电磁推力。

3 动态特性分析

3.1 动态数学模型

TPMLSM 由旋转永磁直线电机演变而来, 二者理论具有相似性, 根据三相永磁旋转同步电机的分析理论^[17-18], 其电压方程和磁链方程分别为

$$\begin{cases} u_a = r_a i_a + p\psi_a \\ u_b = r_b i_b + p\psi_b \\ u_c = r_c i_c + p\psi_c \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + \psi_A \\ \psi_b = M_{ba} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c + \psi_B \\ \psi_c = M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + L_c i_c + \psi_C \end{cases} \quad (4)$$

式中: p 为微分算子, $p = d/dt$; L_i 、 L_{ij} 分别为各相绕组的自感和互感; ψ_A 、 ψ_B 、 ψ_C 是永磁体在三相绕组上产生的励磁磁链。

在 STPMLSM 操动机构建模过程中, 初、次级相对位置和次级速度 v_s 是影响操动机构特性的两个主要因素。根据有限元分析可得, 气隙较大时, 三相绕组的励磁磁链与次级所处的位置 x 之间的关系近似于正弦函数, 通过傅里叶分解可得到磁链中的基波分量, 永磁体在初级 A 相绕组中的基波分量为

$$\psi_A = \psi_m \cos\left(x \frac{\pi}{\tau}\right) \quad (5)$$

A 相绕组励磁电动势为

$$e_A = -\frac{d\psi_A}{dt} = -\psi_m \left[-\frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \right] \frac{dx}{dt} = \quad (6)$$

$$\psi_m \frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \frac{dx}{dt}$$

同理可得 B、C 相绕组的励磁电动势分别为

$$e_B = \psi_m \frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{2\tau}{3}\right)\right) \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

$$e_C = \psi_m \frac{\pi}{\tau} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{4\tau}{3}\right)\right) \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

由于 STPMLSM 气隙较大, 电感变化率很小, 忽略磁阻力, 电磁推力方程为

$$F_{em} = (e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C) \frac{dt}{dx} = \psi_m \frac{\pi}{\tau} \left\{ \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \right] i_A + \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{2\tau}{3}\right)\right) \right] i_B + \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{4\tau}{3}\right)\right) \right] i_C \right\} \quad (9)$$

在 STPMLSM 操动机构的作用下, 动触头分、合闸需满足的数学表达式为

$$F_{cs} = -C \frac{dl}{dt} - K(l - l_0) + F_0 \quad (10)$$

式中: C 为粘滞阻尼系数; K 为弹簧刚性系数; l 为弹簧两端相对位移; l_0 为弹簧两端相对初始位移; F_0 为弹簧预压力。

STPMLSM 操动机构的次级运动方程为

$$\begin{cases} M \frac{dv}{dt} = F_{em} \pm F_{cs} \pm F_p + Mg - f \\ v = \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = F_{em} \pm F_{cs} \pm F_p + Mg - f \quad (12)$$

STPMLSM 与断路器分、合闸的动态数学描述,

反映了动触头运动速度、电磁推力及时间之间的内在联系。

3.2 特性分析

断路器分、合闸时，电磁推力与时间的关系曲线如图 10 所示。

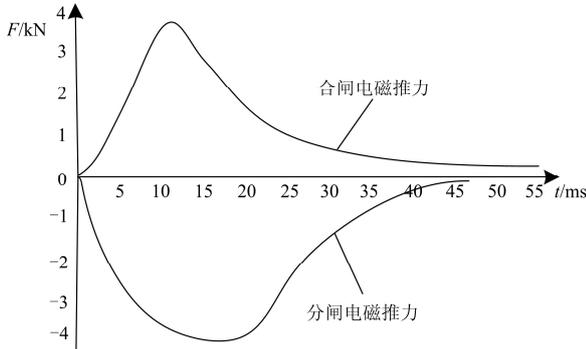


图 10 分、合闸时电磁推力与时间的关系曲线
Fig. 10 Relationship between electromagnetic force and time during opening and closing

由图 10 可知，合闸过程中，STPMLSM 的电磁推力随着电流的上升逐渐增大，在 11 ms 时达到最大值 3515 N，能够满足断路器的合闸所需要的力。随着动触头接近静触头，电磁推力逐渐减小，在 55.9 ms 时，断路器合闸结束，电机推力接近于零。在分闸过程中，电磁推力也是随着电流的上升而逐渐的增大，在 17.1 ms 时达到最大值 3997 N，随后推力逐渐减小，在 46.8 ms 时，断路器分闸结束，电磁推力接近于零。

断路器分、合闸时，动触头行程、速度与时间的关系如图 11 所示。

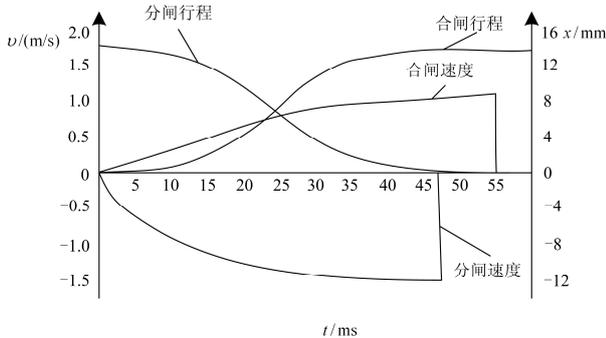


图 11 分、合闸时动触头行程与速度的关系
Fig. 11 Relationship between stroke and speed of moving contact and time during opening and closing

从图 11 可以看出，STPMLSM 先加速后减速，在分、合闸结束时，由于制动保持装置的作用使得 STPMLSM 速度快速减小到零并保持在分、合闸位置。分闸行程随着速度的增大而增加，在 46.8 ms

时，断路器行程达到 14 mm，分闸结束；合闸行程随着速度的增大而减小，在 55.9 ms 时，断路器行程达到 0 mm，合闸结束。所设计的 STPMLSM 操动机构分闸时最大速度能够达到 1.53 m/s，分闸时间 46.8 ms，小于规定值 50 ms；合闸时的最大速度能够达到 1.05 m/s，合闸时间 55.9 ms，小于规定值 65 ms。动触头平均合闸速度为 1.1 m/s，平均分闸速度为 1.31 m/s。

4 结论

(1) 针对传统操动机构(电磁操动机构、弹簧操动机构和永磁操动机构)、旋转电机操动机构以及有槽直线电机所存在的问题，提出将 STPMLSM 用于 12 kV 真空断路器操动机构，根据该断路器分、合闸特性要求，对 STPMLSM 进行结构设计及参数计算，所设计的 STPMLSM 体积小于传统电磁操动机构，且其独特的圆筒形无槽结构更适合于户外、酸、碱、盐恶劣环境等场合。

(2) 建立了有槽与无槽 TPMLSM 操动机构的有限元模型，利用有限元法对其进行静态特性进行仿真分析，结果表明：STPMLSM 操动机构产生的磁阻力较小，且 STPMLSM 的感应电动势和磁链波形接近正弦，利于产生平稳的推力性能，能够减小断路器分、合闸过程中的振动、噪声及结构零件所受的机械应力，避免机械损伤。

(3) 推导出 STPMLSM 和断路器动触头分合闸的数学模型，根据所建立的 STPMLSM 操动机构有限元模型，有限元仿真分析表明，此电机操动机构平均合闸速度为 1.1 m/s，合闸时间 55.9 ms，平均分闸速度为 1.31 m/s，分闸时间 46.8 ms，能够满足断路器分合闸要求，为更高电压等级断路器采用此类电机操动机构提供可靠的依据，具有一定的工程实用价值。

参考文献

[1] 曾君, 徐冬冬, 郭华芳, 等. 面向可再生能源的微电网电能质量特点分析与综合评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 10-16.
ZENG Jun, XU Dongdong, GUO Huafang, et al. Renewable energy-oriented micro-grid power quality characteristic analysis and comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 10-16.

[2] 管瑞良, 刘洪武. 有源配电网中的断路器应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 127-130.
GUAN Ruiliang, LIU Hongwu. Application study on low voltage circuit breakers used for active electric network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 127-130.

- [3] 刘波, 陈轩恕, 兰贞波, 等. 新一代 110 kV 真空断路器挂网试运行研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 126-132.
LIU Bo, CHEN Xuanshu, LAN Zhenbo, et al. Research on trial operation for a new generation of 110 kV vacuum circuit breaker test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 126-132.
- [4] RAHMAN M H, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [5] LIU Z Y, WANG J M, WANG Z, et al. Analysis of axial magnetic field of an iron style bipolar axial magnetic field vacuum interrupter[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2001, 29(5): 749-753.
- [6] 文化宾, 宋永端, 邹积岩, 等. 新型 126 kV 高压真空断路器的设计及开断能力试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 198-204.
WEN Huabin, SONG Yongduan, ZOU Jiyan, et al. Test on novel design and breaking capacity for 126 kV high voltage vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 198-204.
- [7] 冯英, 辛超, 叶祖标, 等. 高可靠性永磁机构真空断路器研究[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 109-113.
FENG Ying, XIN Chao, YE Zubiao, et al. Vacuum breaker with permanent magnetic actuator and high reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 109-113.
- [8] 刘爱民, 毕玉洁, 吴志恒, 等. 高压断路器永磁电机机构及控制系统设计[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(1): 45-50.
LIU Aimin, BI Yujie, WU Zhiheng, et al. Design on high voltage vacuum circuit breaker motor operating mechanism and control system[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(1): 45-50.
- [9] 杨浚文, 朱余启, 姚勇, 等. 断路器闭锁分合闸的处理方法研究和实例分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 132-136.
YANG Junwen, ZHU Yuqi, YAO Yong, et al. Case analysis and study on treatment of open-close blocked breaker[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 132-136.
- [10] 杨凌霄, 朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 62-67.
YANG Lingxiao, ZHU Yali. High voltage circuit breaker fault diagnosis of probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 62-67.
- [11] BOSMA A, CAMERONI R. Introducing a new generation of operating mechanism for high voltage AC circuit breaker[J]. Journal of Electronic Engineering, 2002, 21(3): 233-240.
- [12] 芦宇峰, 孟大伟, 徐永明, 等. SF₆ 高压断路器智能化操动机构的研究与优化[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 94-98.
LU Yufeng, MENG Dawei, XU Yongming, et al. Research and optimization of intelligent operating mechanism for SF₆ high voltage circuit breaker[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(7): 94-98.
- [13] 杨涛, 黄瑜珑, 李大卫, 等. 高压断路器电机操动机构技术的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(4): 521-524.
YANG Tao, HUANG Yulong, LI Dawei, et al. Investigation of motor drive mechanism of high voltage circuit breakers[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(4): 521-524.
- [14] 邵盛楠, 黄瑜珑, 王静君, 等. 高压断路器电动机驱动操动机构的研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 555-559.
SHAO Shengnan, HUANG Yulong, WANG Jingjun, et al. Motor drive mechanism of high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 555-559.
- [15] 张忠蕾, 李庆民, 姜杰. 电力电子控制电动机操动机构分闸运动特性的仿真分析[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 58-63.
ZHANG Zhonglei, LI Qingmin, LOU Jie. Simulation and analysis on switching-off motion characteristic of permanent-magnet synchronous motor driven operating mechanism controlled by power converters for circuit breakers[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 58-63.
- [16] 黄旭珍. 短时高过载无槽圆筒型永磁直线电机电磁及温升特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
HUANG Xuzhen. Research on electromagnetic and temperature rise characteristics of short-term and high overload slot-less tubular permanent magnet linear motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] 余风豪, 吕飞, 张松涛, 等. 永磁同步直线电机的数学模型分析[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(9): 120-122.
YU Fenghao, LÜ Fei, ZHANG Songtao, et al. Model analysis of permanent-magnet synchronization linear motor[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(9): 120-122.
- [18] 陈幼平, 杜志强, 艾武, 等. 一种短行程直线电机的数学模型及其实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 131-136.
CHEN Youping, DU Zhiqiang, AI Wu, et al. Research on model of a new short-stroke linear motor and its experiments[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 131-136.

收稿日期: 2016-11-27; 修回日期: 2017-02-21

作者简介:

郭福柱(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电器、断路器电机操动机构优化设计及其控制; E-mail: guofuzhu1027@163.com

刘晓明(1968—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为能源互联网、智能电器、高电压与绝缘技术、现代高压电器设计理论及应用。

(编辑 姜新丽)