

高压断路器永磁无刷直流电机操动机构的设计及动态仿真

李永祥, 林莘, 徐建源

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110178)

Design of a Novel Permanent Magnet Brushless DC Motor-Driven Operating Mechanism for High-Voltage Circuit Breaker and Its Dynamic Simulation

LI Yong-xiang, LIN Xin, XU Jian-yuan

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: To improve the reliability of high-voltage circuit breakers, a novel operating mechanism, i.e., a limited rotating angle permanent magnetic brushless DC motor-driven operating mechanism, is developed. According to the requirement to mechanical characteristic of 40.5 kV vacuum circuit breaker, the structure of the driving motor and its main parameters, including electric load, magnetic load, pole number, pole-arc coefficient and so on, are designed. The dynamic characteristic of the designed prototype is simulated by finite element method. Simulation results show that the design of the permanent magnetic brushless DC motor is reasonable, its mechanical characteristics, such as electromagnetic torque, current, rotating speed and rotating angle, etc.

KEY WORDS: high-voltage circuit breaker; permanent magnet brushless DC motor-driven operating mechanism; motor design; dynamic simulation

摘要: 为了提高高压断路器的动作可靠性,设计了一种新型操动机构——有限转角永磁无刷直流电机操动机构。针对40.5 kV真空断路器机械特性的要求,对驱动电机结构和主要参数(电负荷、磁负荷、极数及极弧系数等)进行了设计。并采用有限元法对电机的动态特性进行仿真,结果表明,电机设计合理、满足较高的分、合闸速度的要求。

关键词: 高压断路器; 永磁无刷直流电机操动机构; 电机设计; 动态仿真

0 引言

操动机构在断路器中占有重要的地位,它不但要保证断路器动作的长期可靠性,而且要满足灭弧

特性的要求。目前比较常用的操动机构主要有电磁操动机构、弹簧操动机构和液压操动机构等^[1]。近年来,随着新型操动机构的相继问世,特别是永磁机构、电机驱动机构采用电子操动系统控制功率器件产生断路器的分、合操作,运动部件少,能够产生理想的分、合闸运动曲线,提高断路器的开断和关合性能^[2-5]。

永磁无刷直流电机具有直流电机响应快、转矩大的特点,电子式换向克服了直流电机的电刷滑环会产生换向火花及结构复杂等缺点,同时又具有永磁电机无励磁损耗效率高的特点。本文将这种电机应用于高压断路器操动机构本体,根据断路器的机械特性要求,对永磁无刷直流电机进行设计。

1 电机操动机构的设计依据

本文设计的40.5 kV配电机操动机构的真空断路器结构简图如图1所示。这种电机操动机构由1台永磁无刷直流电机直接驱动传动主轴——转轴,电机通过法兰与断路器转轴连接,操动机构与断路器之间通过四连杆机构连接。

高压断路器每次分合闸时间只有几十个ms,所以要求电机的响应速度快,在线路发生故障时能够迅速动作^[6]。对于电机操动机构而言,电机的响应速度也不是越快越好。以断路器的分闸为例,在分闸前期,要求响应的速度较高,使得动触头具有很高的刚分速度,以保证断路器的灭弧能力。在分闸末期,要求响应速度较低,目的是为了减小动触头的速度以削弱对断路器的冲击。由于真空断路器配有

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50577043)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(50577043).

触头弹簧，在合闸过程结束时触头弹簧被压缩，一方面为触头提供预紧力，克服短路电动力的影响，另一方能够提供一部分分闸能量。但在合闸过程中，电机机构必须能够克服触头弹簧的反力^[7]。40.5 kV 真空断路器的技术参数及机械要求如表 1 所示。

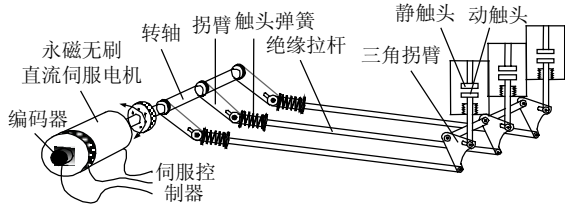


图 1 40.5 kV 配电机操动机构真空断路器结构

Fig. 1 Structure of 40.5 kV equipped motor actuator VCB

表 1 40.5 kV 真空断路器的技术参数及机械要求

Tab. 1 Technique parameters and mechanical requirement of 40.5 kV VCB

项目	参数值
触头开距/mm	25
触头接触行程/mm	8
额定触头压力/N	2 900±300
平均分闸速度/(m/s)	2.0±0.3
平均合闸速度/(m/s)	0.8±0.2
触头质量(单相)/kg	4
触头合闸弹跳时间/ms	≤3

通过对 40.5 kV 真空断路器的分、合闸运动过程进行分析计算，等效到转轴上的反力矩及运动部件的等效转动惯量如图 2 所示。对于真空断路器而言，反力主要有触头弹簧的反力、真空灭弧室对触头的反力以及机械摩擦阻力等。超程阶段触头弹簧提供的反力矩达到 330 N·m，在分闸时为动力，合闸时为阻力。触头运动阶段灭弧室对触头的反力，在分闸时为阻力，合闸时为动力。相对来说摩擦阻力很小，且可以通过提高加工精度、润滑等措施减小，因此在分析计算时忽略不计。由于超程阶段三角拐臂和动触头不参与运动，因此系统等效转动惯量较小，且在超程结束时有突变。

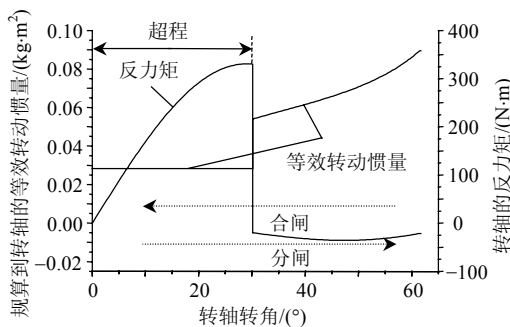


图 2 等效到转轴上的反力矩及运动部件的等效转动惯量
Fig. 2 Counter-torque and equivalent rotating inertia of moving parts reduced to the shaft

通过上述对断路器反力矩特性和等效转动惯量的研究，要求电机操动机构在分闸和合闸过程中能够提供不同的速度特性，由此可以得到电机操动机构的基本设计参数如表 2 所示。

表 2 电机操动机构的基本设计参数

Tab. 2 Fundamental parameters of motor actuator design

项目	参数值
额定功率/kW	15
额定电压/V	DC200
额定电流/A	75
起动电流/A	150
额定转速/(r/min)	500
空载转速/(r/min)	1 000
额定转矩/(N·m)	200
起动(堵转)转矩/(N·m)	400
转角/(°)	60
工作状态/ms	40
外形尺寸/mm	φ200×300

2 永磁无刷直流电机

2.1 结构及主要参数的设计

2.1.1 本体结构

有限转角稀土永磁无刷直流电动机本体结构如图 3 所示。

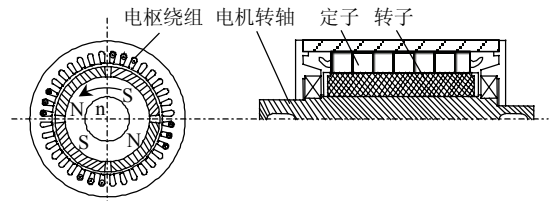


图 3 有限转角永磁无刷直流电机的结构

Fig. 3 Structure of limited angle permanent magnetic brushless DC motor

2.1.2 转子结构

稀土永磁无刷直流电动机永磁体安装在转子上，常见的转子结构主要有 2 种，如图 4 所示。

与矩形永磁体切向磁化永磁电机相比，瓦形永磁体径向充磁结构的永磁电机，由于电枢磁势通过永磁体，永磁体磁导率接近空气，所以这种电机电枢反应电感小，对气隙磁场畸变小，机械特性硬^[8]。本文设计的电机转子结构采用瓦形永磁体径向充磁结构。

2.1.3 定子结构

定子铁心结构与普通的同步电动机及异步电动机相同，对于定子结构本文分析了 2 种，如图 5 所示，一种为多槽结构，一种为少槽结构。

通过有限元的方法对 2 种定子结构电机的齿槽转矩进行了分析，齿槽转矩如图 6 所示。多槽结构的电机齿槽转矩小，周期较短，为一个齿距，对电

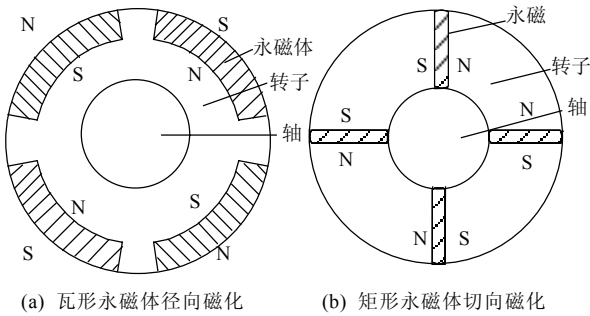


图4 永磁无刷直流电机转子结构
Fig. 4 Rotor structure of permanent magnetic brushless DC motor

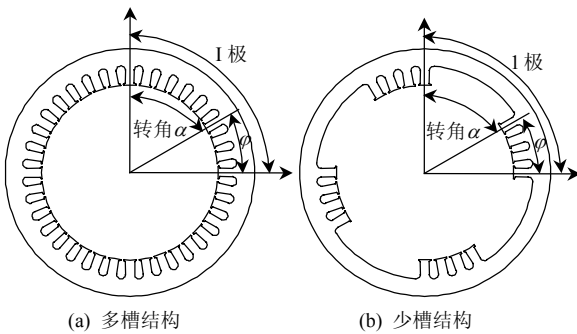


图5 定子结构
Fig. 5 Structure of stator

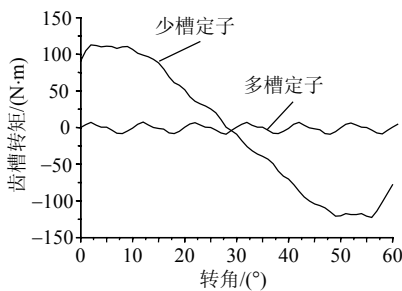


图6 2种定子结构的齿槽转矩
Fig. 6 Cogging torque of two stator structures

机的转矩影响较小。虽然少槽结构的定子去除了不放绕组的槽，有利于减小电机体积、重量，但结构的不平衡使得齿槽转矩较大，且周期较长，为一个极距。从图6可以看出，对电机操动机构而言，少槽结构的电机在前半程和后半程转矩相反，若合理设计，对齿槽转矩加以利用，可使电机前半程加速，后半程减速。本文设计的电机采用多槽结构的定子。

2.1.4 电负荷与磁负荷

电机既要满足断路器性能要求，又要保证体积小，结构合理。在能够满足断路器性能要求的情况下，电机体积设计得越小越好，一方面符合高压断路器小型化的趋势，另一方面，电机成本低、重量轻、安装方便。由于电机的运行时间比较短，所以设计中可以将电机电负荷和磁负荷设计到最大，电机的体积将大大减小^[9]。

一般来说中小功率永磁电机电负荷设计在

300 A/cm, 中等功率永磁电机电负荷设计在 300 A/cm, 本电机属于中小型电机，由于短时运行，可以忽略电机发热的影响。电负荷可以取得很高，本设计预取电负荷 1 000 A/cm, 相当于普通电机过载 5 倍运行。

永磁电机磁负荷指气隙磁密，普通永磁电机气隙磁密在 0.4~0.6 T, 好的能达到 0.8 T 以上，为节省永磁体的用量，提高永磁体的利用率，永磁电机将永磁体工作点设计在磁能积最大处，设计时一般取 0.6~0.8 T。电机电负荷，磁负荷越高，功率密度越大，电机体积越小。本文为了获得高功率密度的电机，将永磁体工作点设计在 1.0 T, 为普通永磁电机的 2 倍，大大提高了电机磁负荷。同时，永磁体厚度的增加能够降低电枢反应电感，减小电枢反应对气隙磁场的畸变，提高电机的伺服性能以及获得较硬的机械特性。

2.1.5 极对数、气隙及极弧系数

对于有限转角永磁无刷直流电机而言，电机的极数直接影响电机的转动范围。对于电机操动机构，其转动范围为 60°，若 $p > 3$, 最大转动范围小于 60°，不符合电机操动机构的要求；取 $p = 3$, 最大转动范围为 60°机械角，起始转矩系数较小，不利于电机的起动；取 $p = 2$, 最大转动范围为 90°机械角，电机转动 60°，设计绕组分布范围为 30°，电机转动过程中转矩系数基本不变，有利于电机的控制；取 $p = 1$ 。最大转动范围为 180°机械角，电机转动 60°，绕组分布范围可设计为 120°。与 4 极电机相比，每极磁路较长，定子轭部磁密较大，不利于气隙磁密的提高，因此本文的电机设计为 4 极电机。

永磁无刷直流电机极弧系数越大，电机出力越大，转矩脉动越小。综合考虑了电机结构、机械强度等各方面因素，本设计取极弧系数为 0.9。气隙是电机中机电能量转换的场所，气隙的设计非常关键。一方面由于气隙磁导率很低，气隙越大、气隙磁密越小，因此气隙应该尽可能小；另一方面，气隙越大电枢反应对气隙磁场的的影响越小，电枢磁势对永磁体去磁的影响越小，气隙越小，对加工的要求越高，安装也越困难^[10]。综合考虑，气隙设计为 1 mm。

本文设计的电机是基于高性能数字信号处理器(digital signal processing, DSP)的伺服控制器进行控制，通过对电机的转矩、转速及转动位置的控制，实现对断路器的智能控制。控制操动机构的自由脱扣、防跳跃、复位、连锁等功能都通过编写程序由

控制器实现。电机一次只接收分闸或合闸指令, 能够避免多个信号同时输入引起机构的误动作, 提高机构可靠性^[11-15]。

2.2 工作原理及数学模型

有限转角稀土永磁无刷直流电动机原理如图 3 所示, 转子上装配有稀土永磁体, 采用瓦形永磁体径向充磁结构。由于电枢磁势通过永磁体, 永磁体磁导率接近空气, 所以这种电机电枢反应电感小, 对气隙磁场畸变小, 机械特性硬。定子上嵌放电枢绕组, 电机绕组只有一相, 通入直流电流后产生的电枢磁势与永磁体产生的转子磁势相互作用, 产生转矩, 驱动转子转动。

有限转角永磁无刷直流电机具有独特的运动特性, 影响电机运动特性的因素主要有电机起动时的位置、绕组在每极下的分布范围等^[16]。起动电势平衡方程为

$$u = ir_a + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

式中: u 为电源电压; i 为电枢电流; r_a 为电枢电阻; L 为电枢绕组电感; e 为电枢感应电势。

电磁转矩方程为

$$T_{em} = C_T \Phi i \quad (2)$$

式中: T_{em} 为电磁转矩; $C_T = pN/2\pi a$, p 为极对数, N 电枢导体数, a 为绕组并联支路数; Φ 为气隙磁通。

感应电势平衡方程为

$$e = C_e \Phi n \quad (3)$$

式中: $C_e = pN/60a$; n 为转速。

运动方程为

$$J(d\Omega/dt) = T_{em} - T_0 - T_2 \quad (4)$$

式中: T_2 为负载转矩; T_0 为空载转矩; J 为转子及所带负载的转动惯量质量; Ω 为电动机角速度。

转角可以表示如下:

$$d\theta/dt = \Omega \quad (5)$$

式中 θ 为转子的转角。

3 电机操动机构的动态仿真

本文采用有限元方法对设计的电机进行二维动态仿真。通过对驱动电机动态特性进行仿真分析, 以验证电机设计是否合理, 同时确保电机操动机构性能满足断路器的要求^[17-19]。对于有限转角永磁无刷直流电机, 每极每相槽数为 3, 定子绕组的并联支路数取 1, 绕组中通单相电流, 绕组的匝数为 120, 漏电感为 0.1 mH, 绕组的电阻为 1.125 Ω , 定子导磁材料选用的是 DW470 硅钢片, 次级采用

永磁体钕铁硼 N40 和 10 号钢。设置初始运动速度和初始电流为零, 转子的转动惯量为 0.07 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。在分合闸时采用直流 200 V 的电源。通过上述电机模型的参数进行分析计算, 并考虑归算到操动机构侧的反力及等效转动惯量, 对电机动态特性进行了仿真。

通过对分/合闸过程的动态仿真计算, 得到电机操动机构在分/合闸时的电磁转矩及电流曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 在分/合闸过程中电磁转矩和电流的变化基本一致, 转矩有一定的波动。在分闸过程中, 当电流最大达到 95 A 时, 最大转矩为 230 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。在合闸过程中, 当电流最大达到 125 A 时, 最大转矩为 300 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。由于分闸时触头弹簧提供部分分闸能量, 合闸时需要触头弹簧储存能量, 所以合闸时的电磁转矩和电流要比分闸时的大。

电机的转速及转角特性曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 分闸时电机转速在超程结束前最大达到 1 100 r/min , 合闸时电机转速最大达到 620 r/min 。分闸时间为 21.5 ms, 合闸时间为 30.5 ms。分、合闸速度特性基本满足了灭弧室对操动机构的要求, 具备对触头分、合闸操作的能力。

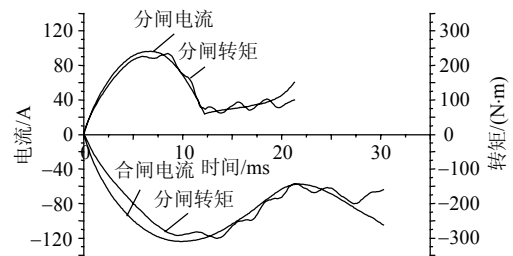


图 7 分闸、合闸时电机的转矩及电流曲线
Fig. 7 Torque and current curves of motor during opening and closing

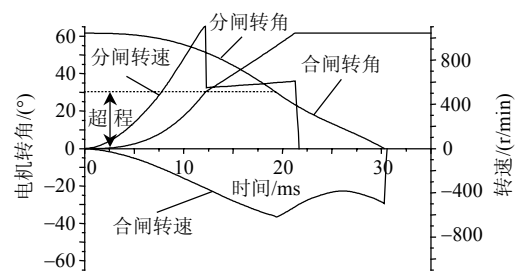


图 8 分闸、合闸时电机的转角及转速曲线
Fig. 8 Speed and angle curves of motor during opening and closing

4 结论

根据动态仿真结果可以看出, 这种电机操动机构的机械特性基本符合电机设计的指标(电磁转矩、电流、转速和转动角度等)。对于电机操动机构, 通过光电编码器实现驱动电机转子位置、绕组电流的

伺服控制, 从而实现对驱动电机转矩、转速的控制。通过对驱动电机的控制间接地控制断路器动触头的行程和速度, 实现对断路器的智能操作。

参考文献

- [1] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 283-299.
- [2] 林莘, 徐建源, 高会军. 永磁操动机构动态特性计算与分析[J]. 中国电机工程学报. 2002, 22(6): 85-88.
Lin Xin, Xu Jianyuan, Gao Huijun. Calculation and analyses of permanent magnetic actuator dynamic behavior[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 85-88(in Chinese).
- [3] Lin Xin, Gao Guijun, Cai Zhiyuan. Magnetic field calculation and dynamic behavior analysis of the permanent magnetic actuator [J]. International symposium on discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000, (6): 532-535.
- [4] 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.
- [5] 林莘, 王德顺, 徐建源. 高压断路器直线伺服电机操动机构及控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 137-141.
Lin Xin, Wang Deshun, Xu Jianyuan. Linear servo motor operating mechanism and control technique for high-voltage circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 137-141(in Chinese).
- [6] 王月, Helmut R. 中压真空断路器在保障城市电网供电可靠性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 102-106.
Wang Yue, Helmut R. Application of medium voltage vacuum circuit breakers to ensure power supply system reliability of intercity network[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 102-106(in Chinese).
- [7] 林莘. 永磁机构与真空断路器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 57-64.
- [8] 王凤翔, 郑柒拾. 永磁无刷直流电机的转矩计算及结构参数对转矩的影响[J]. 电机与控制学报, 2001(6): 107-110.
Wang Fengxiang, Zheng Qishi. Torque calculation of PM brushless DC motor and influence of structure parameter on torque[J]. Electric Machines and Control, 2001, (6): 107-110(in Chinese).
- [9] 唐任远. 现代永磁电机的理论和设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 132-144.
- [10] Hendershot Jr. J R, Miller T J E. Design of brushless permanent magnet motors[M]. Magna physics publishing clarendon press, Oxford, 1994: 107-125.
- [11] 林莘, 王晓宇, 徐建源, 等. 基于单神经元自适应 PID 控制的高压断路器永磁直线伺服电机操动机构的研究[J]. 电气技术, 2008, (9): 68-73.
Lin Xin, Wang Xiaoyu, Xu Jianyuan, et al. Research of self-adapting single neuron PID control in permanent magnetic linear servo motor operating mechanism of high voltage circuit breaker[J]. Electrical Engineering, 2008, (9): 68-73(in Chinese).
- [12] 张忠蕾, 李庆民, 娄杰. 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(in Chinese).
- [13] 陈晓宁, 马志瀛, 苏方春. 超高压智能操作断路器智能控制单元的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 45-47.
Chen Xiaoning, Ma Zhiying, Su Fangchun. Study of intelligent control unit for extra-high voltage intelligent operation circuit breaker [J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 45-47(in Chinese).
- [14] 丁富华, 邹积岩, 段雄鹰, 等. 采用数字信号处理器的永磁机构同步控制系统[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 39-44.
Ding Fuhua, Zou Jiyan, Duan Xiongying, et al. Synchronous control system of permanent magnetic actuator applying digital signal processor[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 39-44(in Chinese).
- [15] 孙弋, 马志瀛, 金立军. 应用电磁开关阀实现断路器智能操作分闸速度调节[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 17-20.
Sun Yi, Ma Zhiying, Jin Lijun. Adjustment to opening velocity of intelligent operation of circuit breaker by electromagnetic on-off valves[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 17-20(in Chinese).
- [16] 李钟明, 刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 70-75.
- [17] 吴亚麟. 稀土永磁同步电动机气隙磁场的研究[J]. 中小型电机, 2004(5): 32-34.
Wu Yalin. Research on air gap magnetic field in repm synchronous motor[J]. S&M Electric Machines, 2004(5): 32-34(in Chinese).
- [18] 王兴华, 励庆孚, 王曙鸿. 永磁无刷直流电机负载磁场及其电磁转矩的计算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 140-144.
Wang Xinghua, Li Qingfu, Wang Shuhong. Analytical calculation of loaded magnetic field and electrical magnetic torque in brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 140-144(in Chinese).
- [19] 尚静, 邹继斌, 胡建辉. 基于动态模型的场路结合法求解异步启动永磁同步电机的起动过程[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 146-151.
Shang Jing, Zou Jibin, Hu Jianhui. Study on the starting process of line-start PMSM based on the field-circuit combined dynamic method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 146-151(in Chinese).



李永祥

收稿日期: 2009-03-27。

作者简介:

李永祥(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能电器, E-mail: 57626738@163.com;

林莘(1961—), 女, 教授, 博士生导师, 从事智能电器、电器电弧理论和高电压、强电流试验技术的教学和科研工作。

(编辑 褚晓杰)