

300 MVA 脉冲发电机组滑差方式起动过程研究

陈 晨, 彭建飞, 王海兵
(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 介绍了 300 MVA 脉冲发电机组的滑差装置。对机组采取滑差方式的起动过程进行了分析和等效建模。根据机组实际起动过程电气波形, 利用非线性规划模型, 建立了滑差装置液体电阻等效仿真模型, 并代入机组参数对起动过程进行仿真, 仿真结果和实际波形吻合, 验证了模型的正确性。在此基础上, 为了使机组的转速达到额定转速, 提出在滑差装置液体电阻低位时并入两级固体金属电阻后短接的方案, 给出了两级固体金属电阻的阻值等理论参数, 并通过仿真验证了方案的可行性。建立的仿真模型可以作为研究不同参数、不同控制策略下的机组起动过程动态特性的重要工具。

关键词: 脉冲发电机组; 滑差; 等效电阻; 非线性规划; 固态金属电阻

中图分类号: TM343+.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0121-06

Research on Startup Process of 300 MVA Motor Generator with Slip Mode

CHEN Chen, PENG Jianfei, WANG Haibing
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The slip device of 300 MVA motor generator (MG) was introduced. The startup process of the MG with slip mode was analyzed and modeled. According to the actual electrical waveforms, the equivalent model of the liquid resistor of the slip device was established by using the nonlinear programming model. And the MG startup process was simulated by using these models with the parameters of MG. The simulation results basically tallied with the measured waveforms. The feasibility of the models was verified. On this basis, in order to reach the rated speed of the MG, the scheme of short connection after incorporating two-stage solid metal resistor into the liquid resistor was put forward. The theoretical parameters such as the resistance of the two-stage solid metal resistor were given, and the feasibility of the scheme was verified by simulation. The models could be used as an important tool to study the dynamic characteristics of the MG startup process under different parameters and different control strategies.

Key words: motor generator; slip; equivalent resistance; nonlinear programming; solid metal resistance

0 引 言

中国环流器 2 号 M(HL-2M) 是中国环流器 2 号 A(HL-2A) 的升级改造装置^[1]。HL-2M 装置供电系统中 4 套脉冲发电机组总容量为 600 MVA, 总储能达 5 GJ, 额定脉冲释能为 2.6 GJ, 其中 2 套 80 MVA 脉冲发电机组向装置环向场线圈电源供电, 1 台 125 MVA 和 1 台 300 MVA 脉冲发电机组向极向场线圈电源和辅助加热系统

供电^[2-3]。

300 MVA 脉冲发电机组由 8 500 kW 绕线式异步电机和 300 MVA 六相同步发电机同轴组成, 采用立轴结构, 轴系转动惯量为 7 300 t·m², 同步转速为 500 r/min。机组采用飞轮储能、脉冲发电的运行模式, 避免对电网的冲击和谐波污染^[4]。

300 MVA 机组由 8 500 kW 绕线式异步电机采取滑差装置起动, 即电动机转子串接可调液体电阻进行机组起动调速。机组整个起动过程存在

作者简介: 陈 晨(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大功率脉冲机组电力拖动。

彭建飞(1975—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为大功率脉冲发电机组的电气工程及自动化控制。

王海兵(1975—), 男, 高级工程师, 研究方向为电能质量研究。

电气过渡过程、电磁过渡过程、机电过渡过程,其起动过程动态特性的全面的理论分析非常复杂。为了直观分析机组滑差方式起动过程动态特性,本文在对机组起动过程进行分析的基础上,建立了机组起动过程等效模型。结合机组运行电气波形,利用非线性规划模型,计算液体电阻高位和低位电阻。基于 MATLAB/Simulink 建立机组起动过程等效仿真模型,并与机组实际起动波形进行对比验证。

由于滑差装置的液体电阻低位的最小阻值不为零,从而不能使机组转速达到额定转速 496 r/min。因此,提出在滑差装置液体电阻低位时并入两级固体金属电阻后短接的方案,理论计算出各电阻相关参数,并利用建立的机组起动模型进行验证。

1 300 MVA 脉冲发电机组滑差装置

300 MVA 脉冲发电机组的滑差装置由大容量液体电阻箱、控制部分、变频电机和电源开关组成,如图 1 所示。机组由 8 500 kW 绕线式异步电机作为原动机,在绕线异步电机转子回路中串入热容量较大的液体电阻,通过滑差控制系统改变其阻值大小来改变电机转差率从而实现机组的无级调速^[5],同时具备软起动的功能。

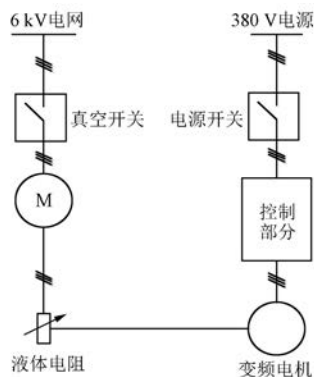


图 1 300 MVA 脉冲发电机组滑差装置示意图

滑差装置的控制部分主要包括异步电机定子电流测量、负反馈控制和 PLC 控制与保护。控制部分可以控制变频电机的起停、正反转和转速;变频电机拖动液体电阻上极板,通过改变上极板与固定的下极板之间的距离,改变液体电阻的阻值。液体电阻为碱液,一侧短接,一侧串入电机 M 的转子侧,其阻值受碱液浓度和温度影响比较大。

机组起动或调速时,将定子电流给定与测量的定子反馈电流在 PLC 中做差比较。如果给定电流大于反馈电流,则通过 PLC 使变频电机正转,下降液体电阻上极板,减小液体电阻阻值。当液体电阻上极板到达最低位时液体电阻阻值最小,则保持液体电阻不动。如果给定电流小于反馈电流,则通过 PLC 使变频电机反转,上升液体电阻上极板,增加液体电阻阻值。上升或者下降上极板均延迟 2 s 执行,通过改变液体电阻阻值来调节定子电流。其中 PLC 调节过程可等效成带限幅的纯积分调节器模块。

2 机组起动过程分析与模型建立

机组起动过程中,同步发电机无励磁,无电磁功率输出。将机组轴系归算到电机轴系,将机组起动过程等效成大惯量电机空载起动^[6]。转轴不考虑弹性的影响,处理为集中刚性的质量块。机组轴系的损耗功率和动态变化功率等效成电机本身损耗功率和动态变化功率。

在电机的起动过程中,液体电阻的阻值是一个单方向减小的动态值。因阻值受碱液浓度和温度影响大,难以直接准确测量。依据绕线式电机的 T 型等效模型,建立 300 MVA 脉冲发电机组起动过程等效模型,根据实际运行数据,计算实际液体电阻高位和低位时电阻值^[7]。

机组起动过程等效模型如图 2 所示。

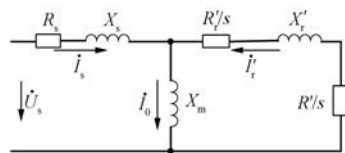


图 2 300 MVA 脉冲发电机组起动过程等效图

图 2 中, $\dot{U}_s$ 为定子相电压, $\dot{I}_s$ 为定子相电流, R_s 为定子电阻, X_s 为定子漏电抗, X_m 为互感电抗, $\dot{I}_0$ 为互感电流, $\dot{I}'_r$ 为转子归算相电流, s 为转差率, R'_r 为转子归算电阻, X'_r 为转子归算漏电抗, R' 为转子侧外串归算电阻。

利用 T 型等效模型可以计算定子电流、转子电流、电磁转矩:

$$\dot{I}_s = \frac{\dot{U}_s}{Z_s + \frac{Z_m Z'_r}{Z_m + Z'_r}} \quad (1)$$

$$i'_r = i_s \frac{Z_m}{Z_m + Z'_r} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3pR'_r}{\omega_1 s} I'^2_r \quad (3)$$

$$\begin{cases} Z_s = R_s + jX_s \\ Z'_r = \frac{(R'_r + R')}{s} + jX'_r \\ Z_m = jX_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: p ——电机极对数;

ω_1 ——供电电源角频率;

T_e ——电磁转矩。

对于大惯量空载电机,在起动过程中,其主要机械损耗为风磨损耗。风磨损耗与电机转速的平方成正比,与空气摩擦因数成正比:

$$P_f = k k_f n^2 \quad (5)$$

式中: P_f ——风磨损耗;

k ——比例因数;

k_f ——空气摩擦因数;

n ——转子转速。

风摩转矩和风磨损耗关系为

$$T_f = \frac{9\ 550 P_f}{n} \quad (6)$$

式中: T_f ——风摩转矩。

电机的运动方程为

$$\frac{J d\omega}{p dt} = T_e - T_f - T_L \quad (7)$$

式中: J ——转动惯量;

T_L ——负载转矩,空载时为零。

利用电机等效模型,计算机组起动时刻的电阻值和液体电阻最低位的阻值^[8-9]。建立非线性规划模型,目标为计算的定子电流与运行记录的定子电流数据最接近,约束条件为在运行过程中,定子电流值小于定子电流给定值。

联合式(1)、式(2)、式(3),以 R'_r 为变量,利用非线性规划来计算,其中目标函数和约束条件为

$$\begin{aligned} \text{o.b min} f(R'_r) &= \text{abs}(I_s - I_{s\text{acq}}) \\ \text{s.t. } I_s(R'_r) &\leq I_s^* \end{aligned} \quad (8)$$

式中: I_s ——定子电流的有效值;

$I_{s\text{acq}}$ ——对应实际运行采集数据的定子电流有效值;

I_s^* ——给定定子电流。

经过计算,起动时液体电阻为 0.109 2 Ω ,最

低位时阻值为 0.030 0 Ω 。

3 机组起动过程仿真与结果

在理论给出机组起动过程等效模型的基础上,基于 MATLAB/Simulink 进行起动过程的等效仿真模型的建立,其中滑差装置控制部分等效成带限幅的纯比例环节,限幅为液体电阻最高位和最低位的电阻值^[10]。由于液体电阻的阻值在起动过程中随着转速的变化而变化,而仿真软件仅有固定阻值的电阻模型,因此需要建立阻值动态变化的等效仿真模型。

3.1 动态电阻等效模型的建立

在 Simulink 中,建立一种等效可变电阻的等效仿真模型,用可变电电压源模型来代替可变电阻。液体电阻串入电机的转子回路中时,其相量图如图 3 所示,因此可以用一个与电流方向相同、大小为转子电流乘以液体电阻值的电压源代替电阻。

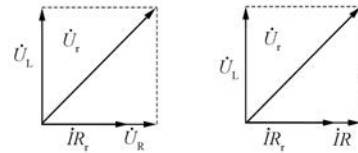


图3 电机转子侧电路图和等效电路图

图 3 中, I 为转子电流, R_r 为转子电阻, $\dot{U}_L$ 为转子电感电压, R 为液体电阻值, $\dot{U}_R$ 为等效电压源的电压。

在 Simulink 中仿真验证等效模型的正确性。先给仿真中的绕线式异步电机的转子侧串上一个电阻,观测其电流电压响应,然后给电机的转子侧串上相应的等效电阻模块,观测其电流电压响应。将两种模型的响应进行了对比,其相差在 10^{-12} 级别,验证了等效模型的正确性。

滑差装置液体电阻仿真等效模型如图 4 所示。

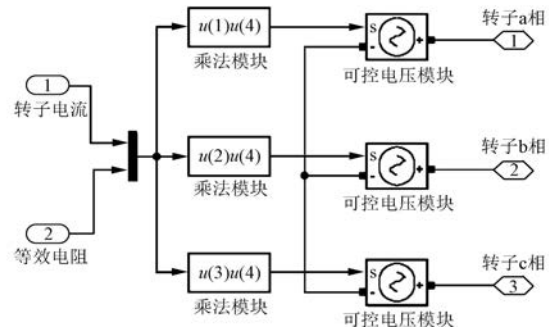


图4 滑差装置液体电阻仿真等效模型

3.2 整体仿真与结果

仿真中,8 500 kW 电机一次侧额定电压为6 kV,额定电流为 992 A;二次侧额定电压为2 498 V,额定电流为 2 062 A。电机定子侧电源为 6 kV,负载转矩

为 0 N·m。300 MVA 脉冲发电机组起动过程仿真模型如图 5 所示,R 模块为滑差装置液体电阻模块和控制部分模块。定子电流有效值给定定为 900 A,上限幅为 109.2 mΩ,下限幅为 30 mΩ。

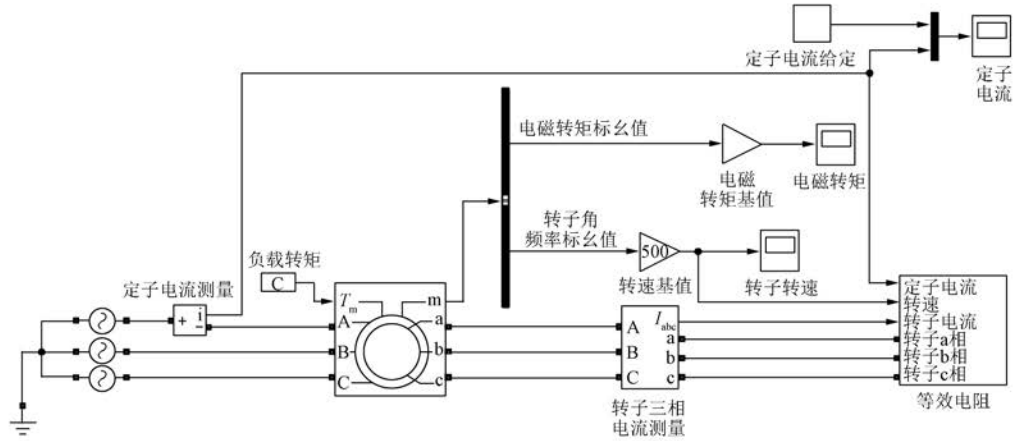


图 5 300 MVA 脉冲发电机组起动过程仿真模型

仿真过程中定子电流有效值经过 85 s 稳定在 860 A,液体电阻从高位经过 921 s 达到低位,达到低位后定子电流有效值经过 47 s 稳定在 697 A,如图 6(a) 所示;转速经过 953 s 稳定在 481 r/min,如图 7(a) 所示。实际机组运行定子电流波形如图 6(b) 所示,转速波形如图 7(b) 所示。

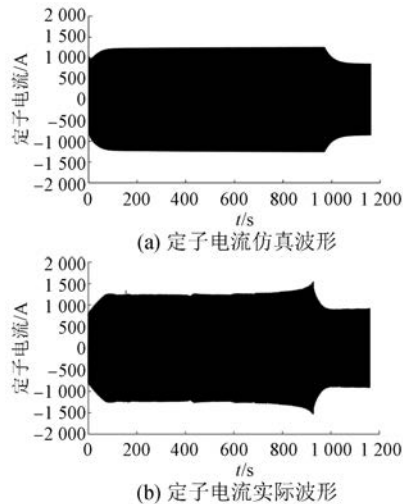


图 6 机组起动过程中电机定子电流仿真与实际波形对比

通过比较,仿真定子电流和转速分别与实际运行波形基本吻合。定子电流对比图同时显示,实际定子电流在即将达到稳定转速时明显比仿真波形偏大,通过分析,初步确定是因为液体电阻的

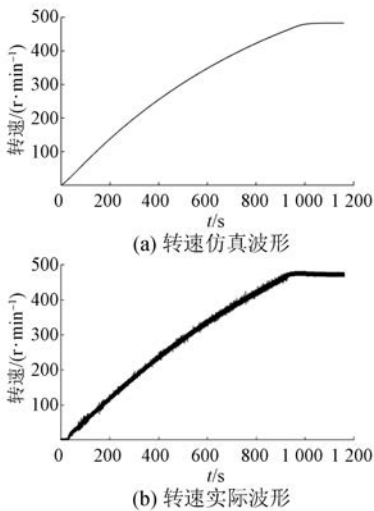


图 7 机组起动过程中转速仿真与实际波形对比

温度在起动过程中不断升高,而滑差控制参数设置中未考虑温度的影响,使得控制的实际定子电流存在一定范围的偏大,需要后期对滑差装置控制系统进行优化。

4 滑差装置优化改造方案设计

滑差装置液体电阻达到低位时,转速只能达到 480 r/min。根据电机运动方程和电磁转矩计算公式,想要进一步提高转速,应加大转子电流。通过减小液体电阻的阻值可以达到加大转子电流

的效果,而液体电阻的阻值不能进一步减小^[11],故提出在液体电阻到达低位、转速稳定后,给液体电阻逐步并入二级固态金属电阻,稳定后再进行转子侧短接的方案。

机组控制保护系统中电机定子电流保护值为 1 050 A。考虑到机组空载大惯量的工况和开关切换时产生的电流,按照定子电流投入切换时定子电流 990 A,根据式(9)和式(10)计算电阻阻值。在已知投入固体金属之前或者投入下一级固体电阻之前或者短接之前的稳定转速后,根据式(9)和式(10)求解应该串入的液体电阻阻值。投入之后,转速稳定时,联立电机运动公式式(7)、电磁转矩计算公式式(3)和摩擦转矩计算公式式(5)及式(6),求解稳定时的转速。根据式(7)求解从投入到电流稳定所需的时间。然后重复计算每一级稳定时的转速,直到某一级投入稳定后转子侧可短接或转速可达到 496 r/min。

$$Z'_2 = \frac{\dot{U}_s Z_m}{\dot{I}_s Z_m - \dot{U}_s} \quad (9)$$

$$Z'_2 = \frac{R' + R'_r}{s} + jX'_r \quad (10)$$

代入机组参数和滑差起动的数据,得出需要两级固态电阻。将归算值转化成实际值,投入第一级固体金属电阻,阻值为 41.2 mΩ,经过 86 s 转速可稳定到 490 r/min;投入第二级固体金属电阻,阻值为 14.1 mΩ,经过 45 s 后转速稳定到 494 r/min。此时转子侧从电机端直接短接,经过 15 s 转速可稳定到 496 r/min。为了保证实际中机组稳定,投入固体金属电阻或者转子侧短接的条件设置为时间条件,并保留裕量时间,液体电阻达到低位 130 s 后投入第一级,100 s 后投入第二级,再经过 60 s 将电机转子侧短接。

为了验证设计的各项参数,进行仿真。仿真模型与滑差起动模型基本相同,在滑差起动后加入固体金属电阻。仿真中,液体电阻在 970 s 达到低位,1 100 s 时在电机转子回路接 17.4 mΩ(液体电阻低位电阻 30 mΩ 和第一级固体电阻 41.2 mΩ 的并)的等效电阻,1 200 s 时在电机转子侧并接 7.8 mΩ(第一级固体电阻 41.2 mΩ 和第二级固体电阻 14.1 mΩ 并之后与液体电阻低位电阻 30 mΩ 的并)的等效电阻,1 260 s 时电机转子侧短接。转速和定子电流波形如图 8 所示。

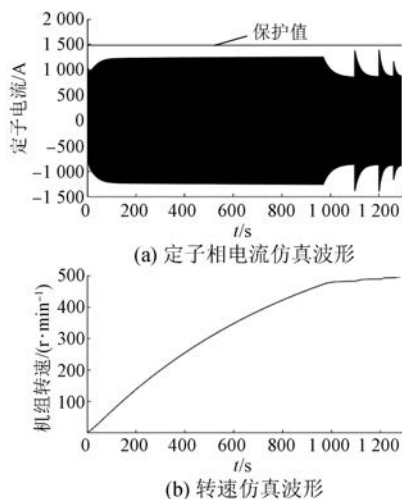


图 8 滑差装置优化改造后机组起动过程仿真图

如图 8(a)所示,定子电流有效值在 100 s 时开始稳定在 880 A,在 970 s 时开始减小,在 1 100 s 之前减小为 610 A,1 100 s 时为 978 A,1 100 s 之后开始减小,在 1 200 s 之前减小为 615 A,1 200 s 时为 986 A,1 200 s 之后开始减小,在 1 260 s 之前减小为 620 A,1 260 s 时为 822 A,在 1 260 s 之后开始减小。图 8(b)波形显示,转速从 0 r/min 开始,在 1 050 s 稳定在 481 r/min,在 1 100 s 开始增加,1 185 s 稳定在 490 r/min,在 1 200 s 开始增加,1 245 s 稳定在 494 r/min,在 1 260 s 开始增加,在 1 275 s 稳定在 496 r/min。

仿真结果表明,在液体电阻上并接固体电阻和进行转子短接时,电机定子电流存在一定范围的冲击,但低于电流保护值,可保证机组安全。转速最终达到 496 r/min,实现了达到机组额定转速的目的。计算结果与仿真结果一致,验证了该方案的可行性和有效性。

5 结 语

本文首先介绍了 300 MVA 发电机组滑差装置,接着在对机组滑差方式起动过程进行了等效处理的基础上,建立了机组起动过程的 T 型等效模型、运动方程等,并利用非线性规划模型获得了滑差装置液体电阻高位和低位时的电阻值。在 MATLAB/Simulink 中,利用可控电压源,建立液体电阻的动态电阻等效模型,验证可行后,对机组采取滑差方式起动过程进行了整体仿真,仿真波形与实际波形基本吻合,验证了所建立模型的正确

性。为了实现机组起动到额定转速,给出了在液体电阻达到低位转速稳定后,逐次投入固体金属电阻,在转速稳定后在电机转子侧短接的方案,计算了固体金属的各级阻值、稳定时间和稳定后的转速。通过 MATLAB/Simulink 仿真了起动及其后并入固体电阻及短接的过程。仿真结果与计算结果一致,验证了方案的可行性。建立的仿真模型可以作为研究不同参数、不同控制策略下的机组起动过程动态特性的重要工具。

下一步将分析机组起动过程中液体电阻温度变化对其阻值的影响,基于仿真软件建立尽可能精确的液体电阻等效模型,并与滑差装置控制优化后的实际波形进行对比验证。

【参考文献】

- [1] 王海兵,彭建飞,宣伟民,等.300 MVA 脉冲发电机定子铁心磁化试验[J].核聚变与等离子体物理,2016,36(4): 334.
- [2] WANG Y L, LIU P G, WANG Y Q, et al. Simulation of Ohmic heating power supply for HL-2M [C] // 2013 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2013.
- [3] YAO L Y, LI W B, CHEN Y H, et al. Design of the HL-2M power supply control system [J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(9/10): 1505.
- [4] 宣伟民,姚列英,李华俊,等.HL-2A 装置供电系统[J].核聚变与等离子体物理,2005,25(4): 9.
- [5] KOZLOWSKI M. Wound rotor to induction motor and VFD conversion case study [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1221.
- [6] 彭建飞,宣伟民,王海兵.HL-2A 装置大功率电动飞轮脉冲发电机组启动过程分析和建模 [C] // 中国核学会 2011 年学术年会, 2011: 214.
- [7] HAMOUDA R M, ALLOLAH A I, BADR M A, et al. A comparative study on the starting methods of three phase wound-rotor induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 918.
- [8] JAFARI H K, MONJO L, CÔRCOLES F, et al. Parameter estimation of wound-rotor induction motors from transient measurements [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(2): 300.
- [9] 黄传金,陈铁军,杨育霞,等.绕线式异步电动机启动特性无传感器测试新方法[J].微电机,2013,46(6): 46.
- [10] DAVIU J A, LÓPEZ A Q, ALARCON V C, et al. Reliable detection of rotor winding asymmetries in wound rotor induction motors via integral current analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2040.
- [11] 张英,付艳,刘勇军.矿井提升机无触点开关启动方法探讨[J].煤矿机械,2013,34(6): 214.

收稿日期: 2018-10-18

(上接第 120 页)

- [10] 韩其国,陈林.防止变频器电压跌落停机的电源方案[J].电源技术,2012(11): 1735.
- [11] 庞胜汉,江伟.防低电压穿越装置在给煤变频器上的应用[J].电气技术,2013(3): 89.
- [12] KUS V, PITTERMANN M, FORT J. The electric drive with indirect frequency converter and asynchronous motors with improved immunity against the supply voltage dips [C] // 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2014: 223.
- [13] 王晓宇,张涛,刘树,等.火电厂辅机变频器低电压穿越电源[J].电力自动化设备,2015,35(5): 152.
- [14] 林志法,宋冬冬,杜海江,等.变频器低电压穿越电源的设计与实现[J].电工电能新技术,2017,36(12): 59.
- [15] 李漠发,彭晓,李永坚,等.基于模糊 PI 调节器的无刷双馈电机直接转矩控制[J].电机与控制应用,2012,39(10): 30.

收稿日期: 2018-10-16