

一种高准确度的异步机群的等效建模与仿真研究

随着我国工业化的发展,异步电动机数量逐年增多,这一动态负载对电力系统的影响更加明显,所以在建模中如何提高电动机群参数聚合准确度成为重要课题。通过对多种异步电动机群聚合方法的对比研究,提出一种简单且聚合准确度高方法,主要用于解决同母线上带有变压器的异步电动机群的聚合问题。同时针对Matlab模型库中固有电动机模型对参数较敏感的缺陷,利用Matlab的Simulink仿真平台建立了一种简单且实用的异步电动机的模型,该模型是在ABC坐标系下建立的,无须考虑参数转换,使用时只需要输入相应的参数即可。通过实例验证了模型的正确性、灵活性和直观性,并证明了聚合电动机模型良好的跟随性,同时可以缩短运行时间。

郑箫若 刘 宁 吉兴全 于永进/山东科技大学电气与自动化工程学院

0 引言

目前,动态负载已成为电力系统中的重要组成部分,为了提高电力系统数字仿真的准确性,对动态负载中的异步电动机进行合理的建模变得至关重要^[1]。与实际的电网不同,在仿真计算中由于受到规模的限制,不可能对所有异步电动机进行逐一建模,通常将异步机群聚合为一台或几台电动机进行工作特性模拟仿真^[2-4]。同时在进行软件模拟时,一台电动机的运行速度要比多台电动机快,可以节省模拟时间^[5-8]。

为了得到更准确的异步电动机聚合模型,国内外许多科研人员进行了广泛和深入的研究,但主要以国外的研究为主,国内起步比较晚,所以相关的理论成果还比较少。已经形成的异步机群聚合方法有:利用空载和堵转实验的聚合模型、电动机稳态模型、电动机静态等

值法以及容量加权法^[9-15]。文献[10]通过采用容量加权平均法来得到聚合感应电动机的参数,各感应电动机参数的加权就是各个等效参数,各异步电动机的容量作为权系数,该方法理论基础稍显不足。文献[11]介绍了同步电动机和异步电动机的聚合方法,采用 dq 坐标下的暂态模型进行等效,通过对暂态过程的研究,提出了一种新的异步机群聚合方法——母线分离运算法。文献[12]是电动机稳态模型下的等效,同时利用K-Mean算法对异步机群进行了划分。认为惯性常数 H 影响异步电动机的动态性能;文献[13-15]利用空载和堵转实验得到异步电动机的聚合模型,定子和转子的漏抗被分为自感和互感两个部分,电动机的阻抗参数由7个部分组成。

以上方法虽然都得到了等效参数,但都只是考虑到电动机转动惯量、转速或惯性常数其中一个作为等效参数,不够全面。针对以上方法的不足,本文在采用基于空载和堵转情况下的异步机群等值方法的基础上,不仅考虑稳态滑差,同时还考虑到异步电动机的转动惯量和惯性常数,使异步机群的等效模型更为准确。

为了验证得到的异步机群聚合模型是否准确,利用Matlab/Simulink建模和运算功能,搭建了一种异步电动机的动态数学模型,通过空载起动、运行和带负载运行这三种不同的实验来验证聚合电动机的跟随性。

异步电动机建模常用的坐标系包



郑箫若/硕士研究生

关键词/Keywords

异步机群参数聚合·
ABC坐标系·
动态模型·
Matlab仿真·

括: ABC、 $\alpha\beta 0$ 和 $dq0$ 坐标系。 $\alpha\beta 0$ 是静止坐标系,同时也主要用于不对称短路的分析^[16-18]。 $dq0$ 坐标系的维数低,能够节省计算时间,但是需要进行参数变换,会增加计算的工作量^[19]。本文的异步电动机模型是建立在ABC坐标系下的,这样在代入电动机参数进行仿真时无须考虑参数转换的问题,更便于调用。

1 异步电动机聚合的模型

确定异步电动机等效电路参数用的是两台异步电动机并联于同一条母线的类型,最终是将两台电动机聚合成一台异步电动机。

两台异步电动机负载的静态等效电路及参数如图1a所示,聚合得到的聚合电动机的等效电路及参数如图1b所示。

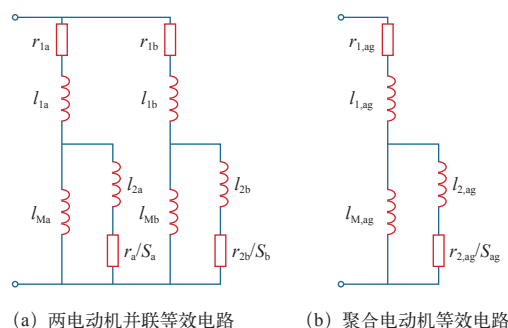


图1 异步电动机单相静态等效电路

图1所示电路中,各符号含义如下: r_{1a} , r_{1b} , $r_{1,ag}$ 分别表示 IM_a , IM_b 及 IM_{ag} 的定子电阻; l_{1a} , l_{1b} , $l_{1,ag}$ 分别表示 IM_a , IM_b 及 IM_{ag} 的定子总自感; r_{2a} , r_{2b} , $r_{2,ag}$ 分别表示 IM_a , IM_b 及 IM_{ag} 的转子电阻; l_{2a} , l_{2b} , $l_{2,ag}$ 分别表示 IM_a , IM_b 及 IM_{ag} 的转子总自感; l_{Ma} , l_{Mb} , $l_{M,ag}$ 分别表示 IM_a , IM_b 及 IM_{ag} 的互感; S_a , S_b , S_{ag} 分别表示 IM_a , IM_b 及 IM_{ag} 的转差率。

1.1 等效电路参数

通过电动机的堵转和开路实验,可得图1中电动机聚合模型的等效参数^[20-22]为

$$r_{1,ag} = \frac{r_{1a}(r_{1b}^2 + \omega^2 l_{1b}^2) + r_{1b}(r_{1a}^2 + \omega^2 l_{1a}^2)}{(r_{1a} + r_{1b})^2 + \omega^2 (l_{1a} + l_{1b})^2} \quad (1)$$

$$l_{1,ag} = \frac{L_{1a}(r_{1b}^2 + \omega^2 l_{1b}^2) + L_{1b}(r_{1a}^2 + \omega^2 l_{1a}^2)}{(r_{1a} + r_{1b})^2 + \omega^2 (l_{1a} + l_{1b})^2} \quad (2)$$

$$r_{ag} = \frac{r_a(r_b^2 + \omega^2 l_b^2) + r_b(r_a^2 + \omega^2 l_a^2)}{(r_a + r_b)^2 + \omega^2 (l_a + l_b)^2} \quad (3)$$

$$l_{ag} = \frac{l_a(r_b^2 + \omega^2 l_b^2) + l_b(r_a^2 + \omega^2 l_a^2)}{(r_a + r_b)^2 + \omega^2 (l_a + l_b)^2} \quad (4)$$

$$r_{2,ag} = r_{ag} - r_{1,ag} \quad (5)$$

$$l_{1,ag} = \frac{l_{1a}(r_{1b}^2 + \omega^2 l_{1b}^2) + l_{1b}(r_{1a}^2 + \omega^2 l_{1a}^2)}{(r_{1a} + r_{1b})^2 + \omega^2 (l_{1a} + l_{1b})^2} \quad (6)$$

$$l_{2,ag} = \frac{l_{2a}(r_{2b}^2 + \omega^2 l_{2b}^2) + l_{2b}(r_{2a}^2 + \omega^2 l_{2a}^2)}{(r_{2a} + r_{2b})^2 + \omega^2 (l_{2a} + l_{2b})^2} \quad (7)$$

$$l_{M,ag} = l_{1,ag} - l_{1,ag} \quad (8)$$

式中, $l_{1a} = l_{1a} + l_{Ma}$; $l_{1b} = l_{1b} + l_{Mb}$; $l_a = l_{1a} + l_{2a}$; $l_b = l_{1b} + l_{2b}$; $r_a = r_{1a} + r_{2a}$; $r_b = r_{1b} + r_{2b}$ 。

1.2 稳态转差率

异步电动机稳态运行的转差率,可以由其输出功率来求得,聚合电动机的输出功率等于电动机a、b输出功率之和,这样可以整理得到关于 s_{ag} 的二次方程为

$$As_{ag}^2 + Bs_{ag} + C = 0 \quad (9)$$

因为A和C常为正值,而B常为负值,所以式(9)的两个根都为正值,可以解得稳态转差 s_{ag} ,为了使聚合电动机更加接近电动机a、b的运行状态,选择较小的根作为聚合电动机的稳态转差。

1.3 惯性常数和转动惯量

由于异步电动机的动态特性与其惯性常数有关^[15],而电动机的转动惯量又影响聚合电动机的跟随性^[17],为此,本文同时考虑惯性常数和转动惯量两种因素,以提高聚合模型的准确度。

聚合电动机的动能等于等效前两台电动机的动能之和,即

$$HP = H_a P_a + H_b P_b \quad (10)$$

式中, H , H_a , H_b 分别为 IM_a , IM_b 和 IM_{ag} 的惯性常数。

考虑到聚合前后电动机的动能守恒,得到聚合电动机转动惯量^[23],即

$$J_{ag} = J_a \left(\frac{\omega_a}{\omega_{ag}} \right)^2 + J_b \left(\frac{\omega_b}{\omega_{ag}} \right)^2 \quad (11)$$

式中, J_a , J_b , J_{ag} 分别为 IM_a , IM_b 和 IM_{ag} 的转动惯量; ω_a , ω_b , ω_{ag} 分别为 IM_a , IM_b 和 IM_{ag} 的角速度。

聚合电动机参数的推导过程也同样适用于2台以上的异步机群, 计算过程和公式可以参照文献[23]。

2 异步电动机的多变量非线性数学模型

为便于研究, 在建立电动机模型前, 本文假定电动机绕组三相对称, 且不考虑磁路饱和谐波和铁心损耗^[24]。

2.1 电压方程及其模型

$$\begin{pmatrix} u_{ABC} \\ u_{abc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ABC} \\ i_{abc} \end{pmatrix} + p \begin{pmatrix} \varphi_{ABC} \\ \varphi_{abc} \end{pmatrix} \quad (12)$$

根据式(12), 建立了定子和转子的电压模型, 如图2所示, 输入量是定子和转子的三相电流和三相电压, 输出的是定转子的三相磁链。

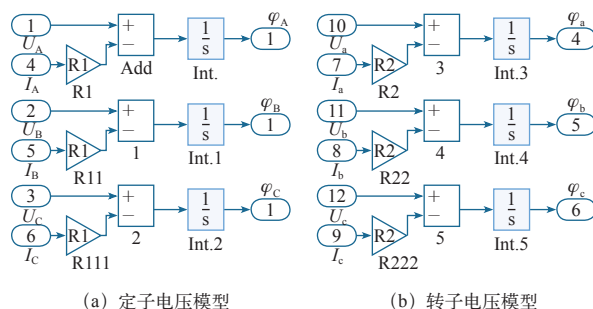


图2 电压模型

2.2 磁链方程及其模型

$$\begin{pmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_s \\ i_r \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中, L_{ss} , L_{rr} 分别为定子和转子绕组的自感矩阵; M_{sr} , M_{rs} 为定转子间互感矩阵。

根据式(13)得到的定子和转子的磁链仿真模型如图3所示。图3a为定子电流仿真模型, 输入量为三相定子磁链和三相转子电流, 输出量为三相定子电流。图3b为转子仿真模型。

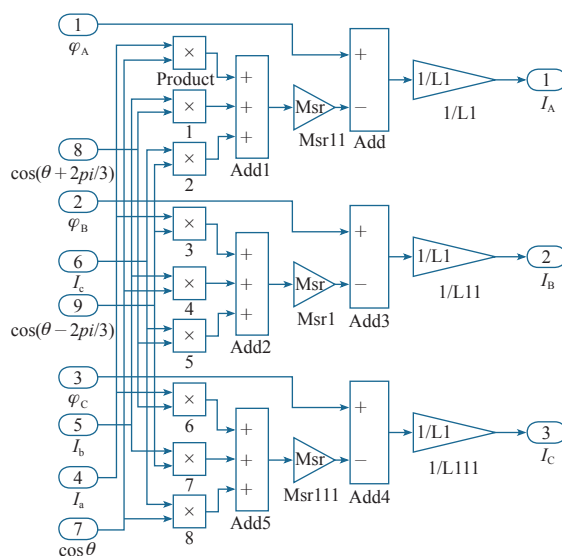
2.3 转矩方程及其模型

$$T_e = \frac{1}{2} p i^T \frac{\partial M_{sr}}{\partial \theta} i_r \quad (14)$$

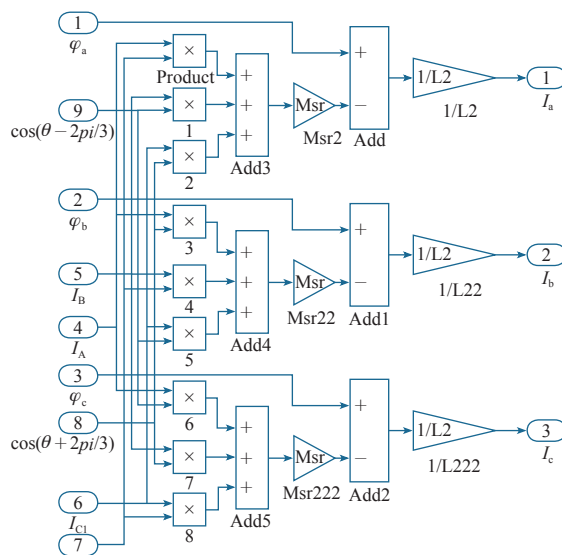
$$\begin{aligned} T_e = & -p M_{sr} [(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) \sin \theta + \\ & (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \sin (\theta + 120^\circ) + \\ & (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) \sin (\theta - 120^\circ)] \end{aligned} \quad (15)$$

式中, p 为异步电动机的极对数。

根据式(15)建立的电磁转矩仿真模型如图4



(a) 定子磁链仿真模型



(b) 转子的磁链仿真模型

图3 转子的磁链仿真模型

所示。输入三相转子和定子电流, 输出电磁转矩。

2.4 电力拖动系统运动方程及其模型

忽略电动机运行过程中各种磨损和消耗, 得到的运动方程式为

$$T_e = T_L + \frac{J}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (16)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (17)$$

式中, ω 为电动机角速度; T_L 为负载转矩; J 为电动机的转动惯量^[26]。

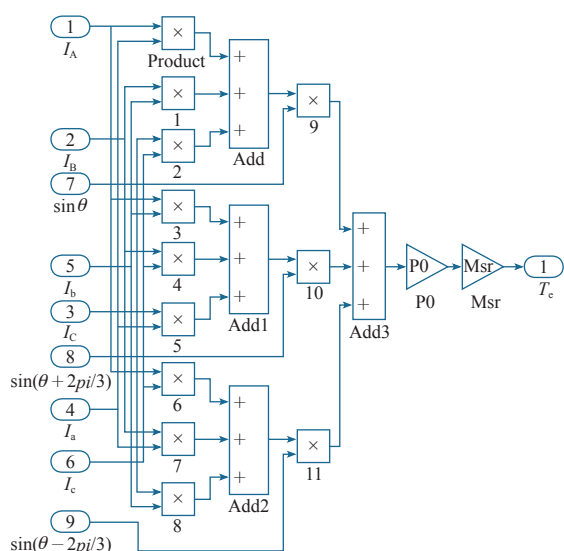


图4 电磁转矩仿真模型

根据式(16)搭建运动仿真模型如图5所示。输入的是电磁转矩和负载转矩，输出的是转动转子角速度，通过变换得到电角度 θ 和转速 n 。

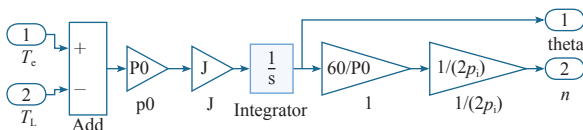


图5 运动仿真模型

式(12)、式(13)和式(15)~式(17)构成了感应电动机的动态非线性数学模型，用结构框图表示，如图6所示。

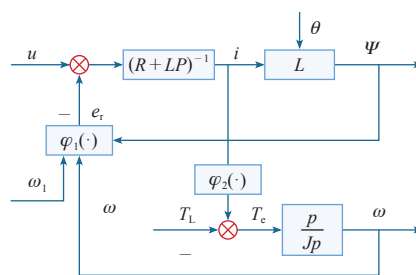


图6 异步电动机的非线性动态结构框图

图6表明异步电动机具有以下几点性质：

- 1) 结构框图中输入了电压 u 、定子的角频率 ω_1 和负载转矩 T_L ，输出的量是磁链 Ψ 和转子的角速度 ω ，状态变量是电流 i 。
- 2) 在 $\varphi_1(\cdot)$ 和 $\varphi_2(\cdot)$ 中存在着非线性因素，同时在电感矩阵 L 中也会存在。

本节搭建的电动机模型既适用于单台电动机，同时也适用于聚合电动机。通过聚合公式得到聚合电动机参数，然后通过Matlab软件进行仿真，将运行结果进行比对，通过仿真来验证模型的性能。

3 异步电动机的仿真模型

最终得到的封装后的异步电动机模型如图7所示。

由图7可知，异步电动机模型由转换模块、电压模块、磁链模块、电磁转矩模块、运动模块

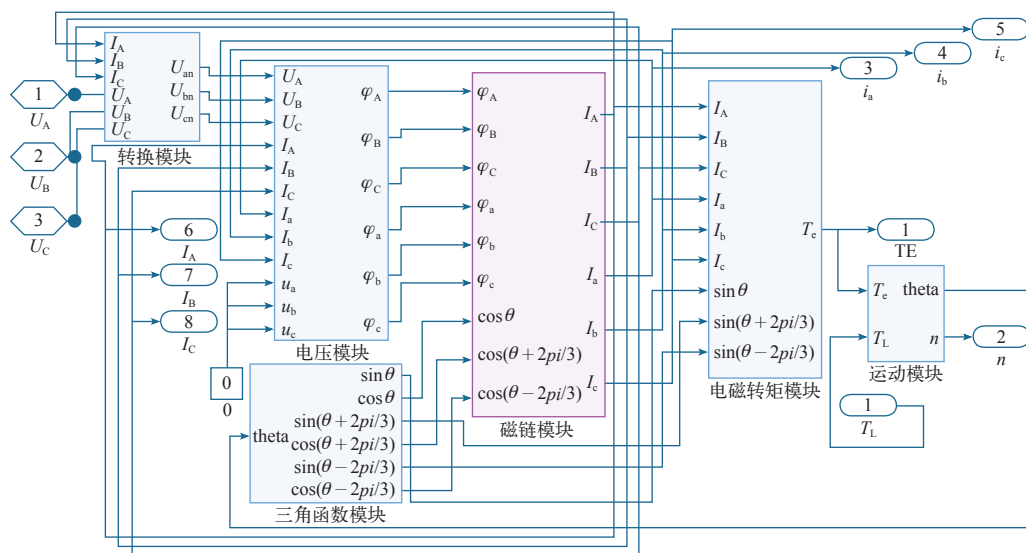


图7 异步电动机模型

和三角函数模块这6个模块组成。由输入端输入三相相电压,经过转换模块,将电气量转换成信号量^[14],输入到电压模块中根据电压方程,磁链方程、电磁转矩方程和运动方程将各个模块连接在一起,经过运行可以得到定子电流、转子电流,转速、角速度以及电磁转矩,通过使用Matlab/Simulink自带的测量元件,可以得到电动机对应的有功功率和无功功率。

4 算例分析

4.1 电动机参数

通过Matlab/Simulink进行建模仿真,来验证聚合电动机的跟随性能。电动机a连在电压为380 V的母线上,电动机b通过电压比为380 V/220 V的变压器连在380 V母线上。两台电动机的参数如表1所示。

表1 电动机参数

电动机参数	电动机a	电动机b	聚合电动机
额定功率 P/kW	3.7	2.2	5.9
额定电压 U/V	380	220	380
额定频率 f/Hz	50	50	50
极对数 p	2	2	2
定子电阻 r_1/Ω	3.52	3.52	2.229 3
转子电阻 r_2/Ω	4.32	4.32	2.735 8
定子总自感 L/H	1.216	1.216	0.770 1
转子总自感 L/H	1.216	1.216	0.770 1
定转子互感 L/H	0.8	0.8	0.506 7
初始转动惯量 $J/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.007 5	0.007 5	0.014

通过运行得到聚合电动机的运行参数,如表2所示。

表2 稳态运行参数

电动机参数	电动机(a+b)	聚合电动机
母线电压 U/V	380	380
频率 f/Hz	50	50
输出电流 I/A	6.751 9	6.745 3
有功功率 P/kW	2.642	2.648
无功功率 Q/kvar	1.054	1.056
转速 $n/(r/\text{min})$	1 459 (1 363)	1 448

通过上述的聚合方法,得到了聚合电动机的参数(见表1),同时运行得到对比参数,(见表2)。

4.2 聚合电动机的仿真运行

利用搭建的电动机模型,先让负载转矩为零,让电动机空载起动,运行一段时间后带负载运行,根据负载转矩的不同可以模拟当负载转矩发生变化时聚合电动机的跟随程度。

两组电动机模型都以零负载起动,运行0.2 s后,负载增大到20 N·m。电流的变化情况如图8所示。

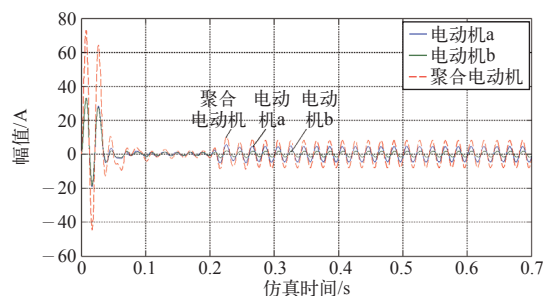


图8 A相定子电流对比

从图8可以看出,在0.2 s前由于负载为零,所以电流很小,0.2 s后负载变大,电流也跟着增大。聚合电动机与a、b两个电动机的运行状态一致。

同时对聚合前后两台电动机吸收的总的有功功率和无功功率进行对比,作为判断聚合效果的依据。有功功率和无功功率对比图如图9和图10所示。

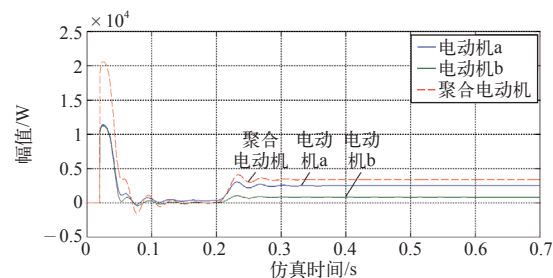


图9 有功功率对比

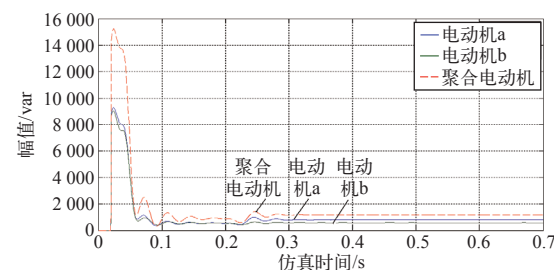


图10 无功功率对比

从图9、图10中可以看出无论负载是否发生变化,聚合电动机的跟随性良好且运行稳定,即拟合率高。

5 结束语

本文基于Matlab/Simulink的仿真平台，建立了ABC坐标系下的感应电动机的仿真模型。并且证明了通过空载和堵转实验得到的电动机聚合模型良好的聚合性，与其他聚合方法相比，更加简单易懂。同时，电动机模型封装后，操作简单，性能良好。通过对异步机群进行合理聚合建模，缩短了模拟运行时间，为大规模异步机群的并网仿真奠定了良好的理论基础。

参考文献

- [1] 张钢, 杜正春, 倪煜, 等. 基于非线性系统降阶的感应电动机群聚合 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (8) : 1893-1899.
- [2] 郭金川, 余贻鑫, 黎鹏, 等. 计及负载率和临界滑差的改进感应电动机加权聚合 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14) : 6-10.
- [3] 赵兵, 汤勇, 赵文朝, 等. 基于故障拟合法的综合负荷模型验证和校核 [J]. 电网技术, 2010, 34 (1) : 45-50.
- [4] 徐晓燕, 孙竞瑜. 模拟厂用电源切换的感应电动机群等值研究 [J]. 现代电力, 2011, 28 (3) : 83-86.
- [5] 曹沛, 吴磊, 赵小林, 等. 一种新的模糊PID控制在电机软启动中的仿真 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (14) : 202-204.
- [6] IEEE Task Force. Load representation for dynamic performance analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8 (2) : 472-482.
- [7] IEEE Task Force. Standard load models for power flow and dynamic performance simulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (3) : 1302-1313.
- [8] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [9] 张建, 孙元章, 徐建, 等. 一种改进的电动机静态聚合方法 [J]. 电力自动化设备, 2009, 32 (5) : 6-10.
- [10] Fathad Nozari, David Kankam M. Aggregation of induction motors for transient stability load modeling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 7 (4) : 1096-1103.
- [11] Xiaodong Liang, C Y Chung. Bus-split algorithm for aggregation of induction motor and synchronous motors in dynamic load modeling [J]. IEEE Transactions on induction applications, 2014, 50 (3) : 2115-2126.
- [12] Zhao Bing, Tang Yong, Zhang Wenchao. Model representations of induction motor group in power system stability analysis [C]. 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM), Taiyuan, 2010.
- [13] Franklin D C, Morelato A. Improving dynamic aggregation of induction motor models [C]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994.
- [14] Louie K W. Aggregation of induction motors based on their equivalent circuits under some special operating conditions [C]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Saskatoon, 2005.
- [15] Louie K W, Member. Aggregating of induction motors in a power system based on their standard specifications [J]. International Conference on Power System Technology, 2006, 5: 1429-1432.
- [16] 孙文凯, 严运兵, 刘旺. 异步电动机动态模型的仿真研究 [J]. 电机技术, 2007 (1) : 18-21.
- [17] 尹俊, 魏云冰, 张国亮. Matlab/Simulink环境下考虑铁耗因素的异步电机建模与仿真 [J]. 郑州轻工业学院学报, 2011, 26 (1) : 83-87.
- [18] 王玉萍. 基于Matlab/Simulink环境下异步电机建模与仿真 [J]. 防爆电机, 2012, 47 (3) : 24-27.
- [19] 张惠萍, 施火泉. MATLAB环境下的异步电动机的数学模型及仿真研究 [J]. 淮阴工学院学报, 2003 (3) : 41-44.
- [20] Kataoka T, Uchida H, Nishikata S, et al. A method for aggregation of a group of induction motor load [C]. 2000 International Conference on Power

- System Technology, Perth, 2000.
- [21] 汤蕴璆, 史乃. 电机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [22] Suwanwej W, Aunakorn. Estimation of short circuit current due to a group of induction motors using an aggregation model [C]. International conference on Power System Technology-POWERCON, Singapore, 2004.
- [23] Arif Karakas, Fangxing Li, Sarina Adhikari. Aggregation of multiple induction motors using MATLAB-based software package [C]. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, Washington, 2009.
- [24] 黄守道, 邓建国, 罗德荣. 电机瞬态过程分析的MATLAB建模与仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [25] 张洪宝, 王秀和, 仲慧. 三相异步电动机的MATLAB仿真研究 [J]. 电机技术, 2009 (4): 14-17.
- [26] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统—运动控制系统 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- (收稿日期: 2016-04-12) **EA**

(上接第56页)

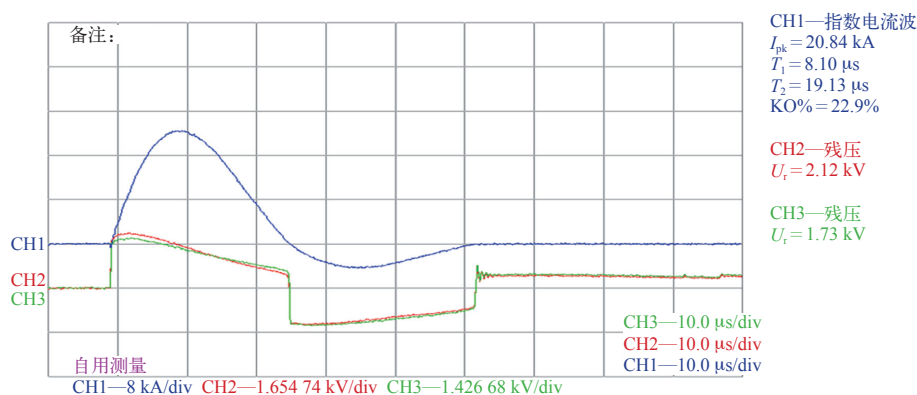


图7 SSD7 464-0CC的SPD与80 A的熔断器的配合试验波形

参考文献

- [1] 杨文斌, 周浩. 风电机组过电压保护与防雷接地设计 [J]. 高电压技术, 2008 (10): 2081-2085.
- [2] 王宝归, 曹国荣, 唐建平. 风电机组的防雷保护 [J]. 风能, 2012 (3).
- [3] 蔡睿, 史晓鸣. 风力发电机组防雷保护系统电涌保护器 (SPD) 的计算和选用 [J]. 能源与环境, 2010 (4): 68-69.
- [4] Vavra, Chris. Surge protection devices [J]. Consulting-Specifying Engineer, 2013 (6).
- [5] 孙丹峰, 季幼章. 电涌保护器 (SPD) 和保护断路装置的配合应用 [J]. 电源世界, 2015 (5): 38-41.
- [6] 毛柳明. 高压熔断器开断过电压研究 [M]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [7] 赵燕峰. 风电变频器熔断器选型研究 [J]. 变频器世界, 2015 (10): 38-41.
- [8] 张高龙. 浪涌保护器 (SPD) 的基本原理及应用 [J]. 电器工业, 2011 (3): 62-65.
- [9] 刘中平. 浪涌保护器的应用分析 [J]. 低压电器, 2009 (24): 33-36.
- [10] 姜中民, 刘磊, 宫翠凤. 关于电源SPD后备保护装置安装问题的分析 [J]. 现代建筑电气, 2011 (5): 59-61.
- [11] 黄鹏程, 李韦霖, 于瑞平, 等. 电涌保护器 (SPD) 在防雷工程中的应用分析 [J]. 甘肃科技, 2013 (22): 60-62.
- [12] 李润源. 浅谈电涌保护器 (SPD) 后备保护装置的选择 [J]. 电气时代, 2015 (8): 101-103.
- (收稿日期: 2016-02-15) **EA**