

基于Simulink的大型异步电动机再起动特性仿真

随着社会的发展,大型异步电动机被越来越广泛地使用在各类领域,当接有大型异步电动机的区域电网受到干扰时,系统电源丢失,备用电源快速接入,大型异步电动机再起动后,会对区域系统造成影响,尤其会影响系统的稳定。利用Simulink搭建了该区域电网模型,针对不同额定功率、转动惯量下的异步电动机再起动特性进行仿真。经过仿真分析发现,在相同额定功率的情况下,异步电动机的转动惯量越大,异步电动机再起动达到稳定时间越长,但所遭受的冲击电流和电磁转矩振荡较弱;而在相同转动惯量情况下,不同额定功率的异步电动机在受到干扰时,对电动机转速、电磁转矩和定子电流的影响都是相同的,并无明显特征差异。

陈垠宇 梅 宏/昆明理工大学城市学院信息工程系

0 引言

随着工业发展,大型异步电动机越来越多地被使用于各种各样的场合,如石油、矿产、电力、港口和化工等各类工程领域,常用作引风机、泵、压缩机、卷扬机、离心机及运送机等各种大型机械设备的驱动装置。其功率一般在几百千瓦以上,机端电压一般用3~10 kV的电压等级,目前也出现了一些功率在10 000 kW以上的超大型异步电动机。由于大型异步电动机起动电流很大,一般为额定电流的4~7倍,它的起动会对电力系统造成显著影响,严重时可能会拖垮电网电压,造成系统崩溃。因而目前大型异步电动机的起动方式多采用软起动^[1-3],以削弱或消除多台大型异步电动机起动时对系统造成的影响,但随着电

动机容量的不断增大,使用变频器软起动的成本也在不断提高。

目前,对异步电动机的研究多集中在异步电动机一次起动时对系统的影响^[4-8]以及异步电动机模型的选取对系统仿真准确性影响的分析^[9-11]。另一些研究是对故障发生时造成系统主电源丢失,备用电源投入,电动机仍以全压起动的方式重启,投切时间长短对系统稳定的影响^[12]。但对于装有大型异步电动机的工厂在系统电源丢失备用电源紧急投入时,对电动机再起动的状态并未有研究。

本文基于以上研究,首先建立了大型异步电动机的动态模型和同步发电机模型,然后利用Matlab提供的Simulink进行模型仿真。Simulink是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包,它具有模块化、可封装、面向结构图编程及可视化等特点,大大提高了系统仿真结果的有效性和可靠性。仿真实验结果表明:在相同额定功率下,异步电动机的转动惯量越大,受到干扰时,异步电动机再起动达到稳定时间越长,但所遭受的冲击电流和电磁转矩振荡较弱。在相同转动惯量下,不同的额定功率异步电动机在受到干扰时,对电动机转速、电磁转矩和定子电流的影响都是相同的,并无明显特征差异。

1 大型异步电动机和同步发电机建模

针对异步电动机,采用异步电动机



陈垠宇/助理工程师

关键词/Keywords

大型异步电动机·
再起动特性·
转动惯量·
电磁转矩·

四川省教育厅自然科学基金项目(15ZB0419),攀枝花市科技局社会发展基金项目(2015CY-S-14)。

动态负荷模型,该模型常用于电力系统稳定性研究,动态模型通过机械动力学、定子磁通动力学和转子磁通动力学来描述模型。异步电动机的电气部分一般采用四阶状态方程描述,状态方程如下

$$\begin{cases} u_{qs} = R_s i_{qs} + p\varphi_{qs} + \omega\varphi_{ds} \\ u_{ds} = R_s i_{ds} + p\varphi_{ds} + \omega\varphi_{qs} \\ u'_{qr} = R'_r i'_{qr} + p\varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{dr} \\ u'_{dr} = R'_r i'_{dr} + p\varphi'_{dr} + (\omega - \omega_r)\varphi'_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $p = d/dt$; R_s 为定子绕组电阻和漏抗; R'_r 为归算到定子侧的转子绕组电阻和漏抗; φ_{ds} 、 φ_{qs} 为定子d轴和q轴的磁通分量; φ'_{dr} 、 φ'_{qr} 为归算到定子侧的转子d轴和q轴磁通分量。

机械部分转子运动方程如下

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m) \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \end{cases} \quad (2)$$

式中, T_m 为加在电动机轴上的机械转矩; T_e 为电磁转矩; θ_m 为转子机械角位移; ω_m 为转子机械角速度; H 为电动机惯性常数; F 为考虑d、q轴在动态过程中的阻尼作用以及转子运动中机械阻尼作用的定常阻尼系数。

针对同步发电机模型,其电气部分一般采用四阶状态方程描述,电压方程如下

$$\begin{cases} u_d = -\omega\varphi_d - r_i i_d \\ u_q = \omega\varphi_q - r_i i_q \\ u_f = p\varphi_f - r_f i_f \\ 0 = p\varphi_d + r_d i_d \\ 0 = p\varphi_h + r_h i_h \\ 0 = p\varphi_q + r_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_d 、 r_q 为d轴和q轴的阻尼绕组电阻; r_f 为励磁绕组电阻。

磁链方程为

$$\begin{cases} \varphi_d = -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_d \\ \varphi_f = -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{fd} i_d \\ \varphi_d = -x_{ad} i_d + x_{fd} i_f + x_d i_d \\ \varphi_q = -x_q i_q + x_{aq} i_h + x_{aq} i_q \\ \varphi_h = -x_{aq} i_d + x_h i_h + x_{aq} i_q \\ \varphi_q = -x_{aq} i_d + x_{fd} i_h + x_q i_q \end{cases} \quad (4)$$

机械部分转子运动方程如下

$$\begin{cases} \Delta\omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - k_d \Delta\omega(t) \\ \omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Delta\omega(t)$ 为发电机转子角速度偏差; H 为惯性常数; k_d 为阻尼系数; $\omega(t)$ 为发电机的转子转速; ω_0 为初始速度。

2 系统建模

在装备有大型异步电动机的大型工厂中,为了防止电动机在起动时对系统造成影响,这类工厂都会安装备用发电机组,以尽可能降低或消除此类影响。本文在该背景下建立了一个小型的区域电网,用于研究多台大型异步电动机在系统电源丢失、备用电源投入后的再起特性。

由于实际模型中存在很多影响因素,为提高建模结果的可靠性,故对提出的模型作出相应的假设:

- 1) 假设备用发电机组有足够的强励磁系统,能够提供充足的无功需求,保证电压稳定。
- 2) 假设接入工厂的电网可靠性很高,可以经受住较大的冲击电流。
- 3) 假设断路器为瞬时动作,没有延时。
- 4) 假设当电网供电系统出现问题,备用发电机组接入系统时,所有异步电动机均是有载全压起动。
- 5) 假设系统正常运行时,整个工厂供电都是由电网供给,备用发电机组仅在系统故障时投入使用。
- 6) 假设电网在3.8 s时由于故障跳闸退出运行,经过0.2 s后备用发电机组接替系统向大型异步电动机和负荷供电。

仿真系统主接线结构如图1所示,设定由系统

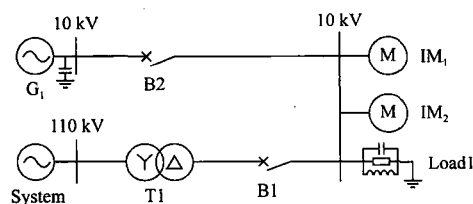


图1 系统主接线

电源和备用发电机组给两台大型异步电动机和负荷供电，系统正常运行时仅由系统电源供电，当系统电源因故障退出时，备用发电机组才投入。

图1中，System为接入工厂的区域电网；G₁为备用发电机组；IM₁、IM₂为大型异步电动机；Load1为工厂其余静态等效负荷；B1为工厂外部电

源断路器；B2为备用发电机组出口断路器。

图2为利用Simulink搭建的系统仿真模型，主要利用了SimPowerSystems库中的异步电动机标准模型模块、同步发电机标准模型模块、断路器模块、变压器模块、静态负荷模块和无穷大系统电源模块。

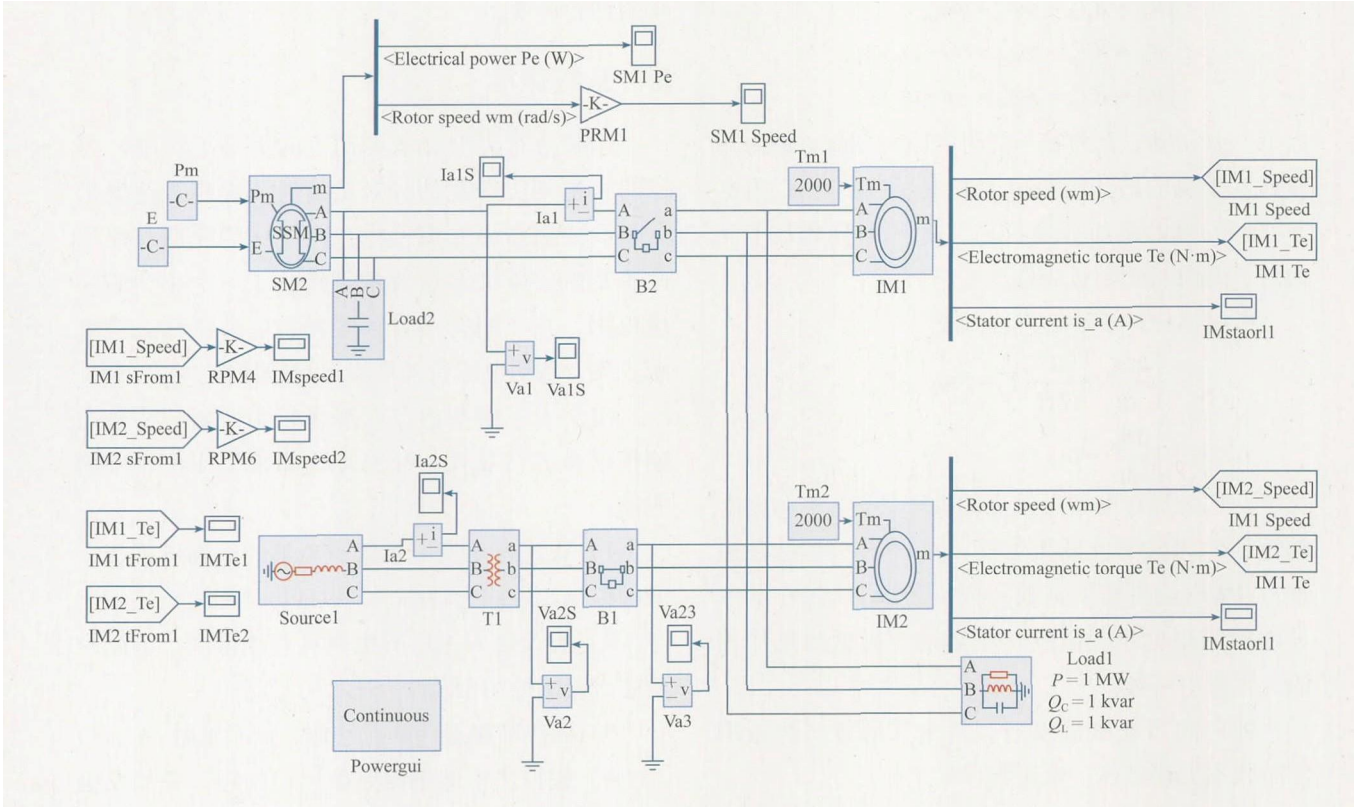


图2 系统仿真模型

- 其系统参数取为：
- 1) 异步电动机输入的机械扭矩 $T_m=2\,000\text{ N}\cdot\text{m}$ 。
 - 2) 异步电动机转差 $s=1$ 。
 - 3) 按系统潮流计算方式，系统电源为平衡节点，备用发电机组G₁为PV节点。
 - 4) 工厂其他负荷参数 $P=1\text{ MW}$ ， $Q_L=1\text{ Kvar}$ ， $Q_C=1\text{ Kvar}$ 。
 - 5) 备用发电机组G₁，异步电动机IM₁、IM₂机端额定电压 $U_N=10\text{ kV}$ 。
 - 6) 异步电动机参数均参考西门子1LA4系列和1MC0系列高压笼型异步电动机参数。
 - 7) 异步电动机极数 $p=4$ 。

3 系统建模仿真结果与分析

本文分别对大型异步电动机转动惯量变化时和额定功率变化时的情况进行仿真和分析。在异步电动机额定功率数恒定、改变异步电动机转动惯量时，2台异步电动机参数如表1所示。

表1 额定功率恒定时大型异步电动机参数

异步机 编号	额定转速 /(r/min)	额定转矩 T_e /N·m	转动惯量 J /kg·m ²	额定功率 P_N /kW
IM ₁	1 500	3 213	11	500
IM ₂	1 500	3 202	22	500

仿真结果如下：两台大型异步电动机处于不同转动惯量下且额定功率恒定时，仿真时间为5 s，在

3.8~4 s时切换电源达到新稳定状态后的转速仿真曲线如图3所示, 电磁转矩变化仿真曲线如图4、图5所示, A相定子电流在0~5 s时的电流变化仿真曲线如图6所示。

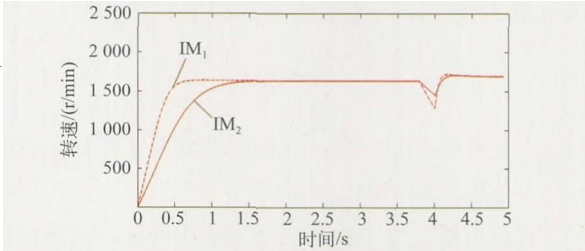


图3 额定功率恒定时大型异步电动机转速变化曲线

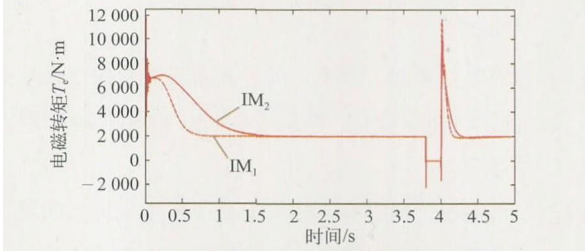


图4 额定功率恒定时0~5 s电磁转矩变化曲线

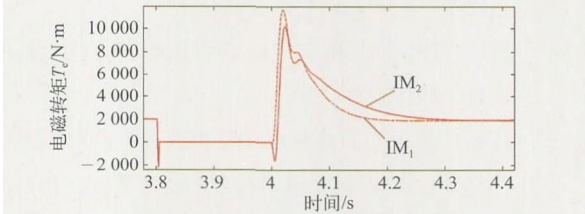


图5 额定功率恒定时3.8~4.4 s电磁转矩变化曲线

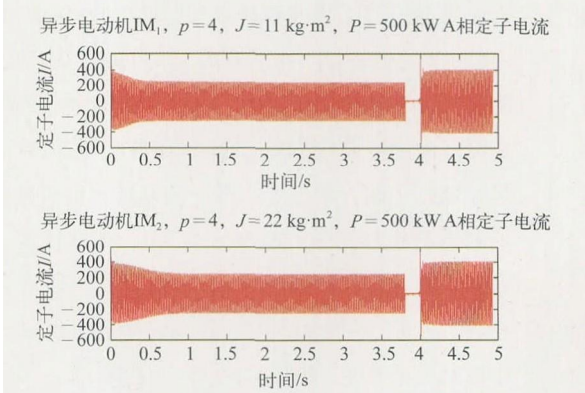


图6 额定功率恒定时A相定子电流在0~5 s内的电流变化曲线

通过对大型异步电动机在额定功率恒定、改变异步电动机转动惯量的情况下进行分析可以得出: 大型异步电动机转动惯量越大, 达到额定转速的时间越长; 受到干扰时, 电动机转速波动越小, 电动机转速恢复的速度越快。异步电动机IM₂电动机转速曲线在3.8 s时遭受干扰, 其转速下降程

度和恢复速度最快。

由图4、图5可知, 电磁转矩是异步电动机将电能转变为机械能的介质, 只有当二者平衡时, 电动机才能稳定运行。4 s时紧急电源投入, 4.001 s时IM₁电动机电磁转矩有最小值为-114.6 N·m, 4.02 s时IM₁电动机电磁转矩有最大值11 670 N·m, 峰值差为11 555.4 N·m; 同时, 在4.006 s时IM₂电动机电磁转矩有最小值为-1 623 N·m, 4.023 s时IM₂电动机电磁转矩有最大值10 220 N·m, 峰值差为8 597 N·m。说明转动惯量越小的异步电动机电磁转矩的振荡也就越强烈, 但转动惯量越小的异步电动机恢复到稳态的时间也越短, IM₁电动机在0.2 s以后便达到新的稳态, 而转动惯量较大的异步机, 虽然电磁转矩波动很小, 但是其恢复时间较长, 大约在0.3 s后达到新的稳态。

由于定子电流是产生转子感应磁场的主要来源, 电动机在起动时, 定子电流需要增大到一定数值, 才会在转子上产生感应电流, 电磁转矩越大的电动机, 磁场的建立时间越长, 电动机在受到干扰后, 再起动时定子电流比第一次起动时电流要大, 且伴有极短的冲击电流。由图6可知, 通过在4.001 s和4.009 s时对冲击电流峰值进行采样, 计算得到IM₁电动机和IM₂电动机冲击电流峰值差分别为4.6 A和26.2 A, 说明转动惯量越小的异步电动机再次起动时所经受的冲击电流也就越小, 甚至没有。

在异步电动机转动惯量恒定、改变额定功率时, 2台异步电动机参数如表2所示。

表2 转动惯量恒定时大型异步电动机参数

异步电动机 编号	额定转速 (r/min)	额定转矩P _e (N·m)	转动惯量J (kg·m ²)	额定功率P _N (kW)
IM ₁	1 500	1 406	22	220
IM ₂	1 500	2 016	22	315

仿真结果如下: 两台大型异步电动机处于不同额定功率下且转动惯量恒定时, 仿真时间为5 s, 3.8~4 s时切换电源达到新稳定状态后的转速仿真曲线如图7所示, 电磁转矩变化仿真曲线如图8所示, A相定子电流在0~5 s时的电流变化仿真曲线如图9所示。

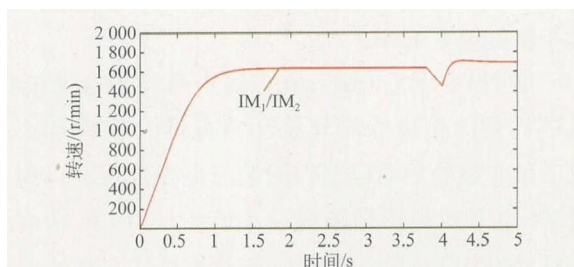


图7 转动惯量恒定时大型异步电动机转速变化曲线

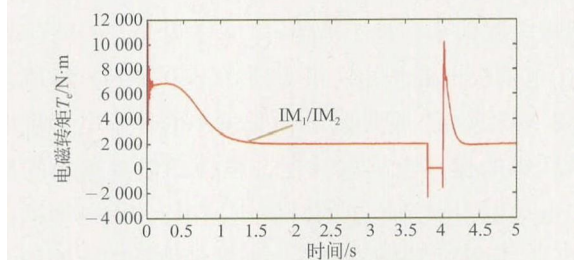


图8 转动惯量恒定时0~5 s电磁转矩变化曲线

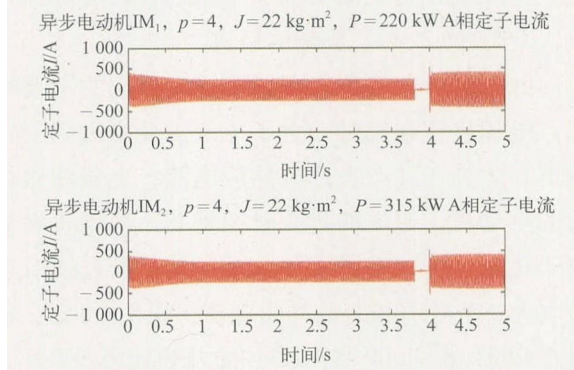


图9 转动惯量恒定时A相定子0~5 s内的电流变化曲线

通过分析可知,当异步电动机转动惯量恒定且改变额定功率时,对转速、电磁转矩和定子电流的影响上并无差异。

4 结束语

本文以接有备用发电机组的大型工厂为例,在系统供电出现困难时,备用发电机组经过0.2 s快速投入向大型异步电动机供电,维持工厂设备正常运转。对大型异步电动机再起启动特性的两种情况进行分析后,得出以下结论:

1) 在相同额定功率时,异步电动机的转动惯量越大,受到干扰时,异步电动机再起启动达到稳定时间越长,但所遭受的冲击电流和电磁转矩振荡较弱。在相同转动惯量下,不同的额定功率异步电动机在受到干扰时,对电动机转速、电磁转矩和定子电流的影响都是相同的,并无明显特征

差异。

2) 利用Simulink进行建模仿真,提高了模型的可靠性,通过仿真结果可以研究电动机故障时的参数变化情况,从而在事故发生时可以有相应的处理方案,降低事故带来的损失。

参考文献

- [1] 晏有矿. 高压电机软启动的现状与发展 [J]. 机电信息, 2010 (24): 18-22.
- [2] 贾国荣. 电子式软启动下感应电机的启动过程 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (3): 24-27.
- [3] 张斌, 尚刚, 欧英, 等. 高压交流感应电机软启动技术的发展 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006 (2): 75-78.
- [4] 张晓辉, 胡晓芬. 浅析大功率异步电机启动对二滩电厂厂用电系统电压的影响 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (16): 112-114.
- [5] 樊华. 浅谈高压电机对10 kV电网的影响 [J]. 机电信息, 2010 (18): 143.
- [6] 杨劲. 基于不同感应电动机负荷模型的电力系统仿真分析比较 [J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30 (3): 109-114.
- [7] 吾布里·阿依丁. 关于煤矿高压电动机的电磁转矩不稳定动态分析 [J]. 电机技术, 2012 (6): 15-18.
- [8] 陈永亭, 李莲子, 孙元章. 大型电机启动特性的研究 [J]. 实验技术与管理, 2001, 18 (3): 145-147.
- [9] 吴红斌, 丁明, 李生虎, 等. 发电机和负荷模型对暂态稳定性影响的概率分析 [J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 19-21.
- [10] 赵兵, 汤涌. 感应电动机负荷的动态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7): 71-76.
- [11] 纪静. 备用电源自动投入时电网动态过程分析与控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [12] Tanneeru S, Mitra J, Patil Y J, et al. Effect of large induction motors on the transient stability of power systems [C]. 39th North American Power Symposium, Las Cruces, NM.

(收稿日期: 2016-06-20) **EA**