

复数域中晶闸管-电动机系统复杂瞬态的数值计算

崔学深,张自力,李和明

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要: 针对三相交流调压电路的晶闸管-电动机系统中电动机的各种复杂瞬态,提出了一种在复数域中求解电动机运行行为的数值计算方法,与传统时域数值计算相比,该方法能够充分利用电动机空间矢量模型阶数较低的优点,减少状态变量个数,有利于电动机复杂瞬态过程计算的简化。基于异步电动机的空间矢量数学模型,在复数域中推导出电动机各种复杂瞬态下的状态电压方程;以一种系统供电电源的快速切换为例,使用四阶龙格-库塔法在复数域中对所推导的状态方程进行数值计算,给出定子电流空间矢量轨迹及其对应的三相电流波形图。实测结果验证了所提复数域数值计算方法和所推导的状态方程的正确性和可行性。

关键词: 晶闸管-电动机系统; 瞬态; 复数域; 空间矢量; 状态方程; 计算; 电动机

中图分类号: TM 346

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.07.019

0 引言

晶闸管作为开关器件的三相交流调压电路,是一类仅改变电压大小而不改变频率的交流/交流电压变换器^[1],其把晶闸管开关器件串接在交流电源和交流负载之间,通过改变晶闸管的通、断状态,控制负载上的电压波形。该电路输出的是三相恒频变压交流电,通常与三相异步电动机结合组成晶闸管-电动机系统,用于控制施加在电动机定子端的电压,从而实现异步电动机的变压调速^[2]、软启动^[3-6]、重合闸^[7-9]、软投入^[10]、电源切换^[11-13]、抽油机断续供电节能^[14-16]、星角节能控制^[17]等。显然,在这些应用中晶

闸管-电动机系统结构相同,但其控制目的不同,有的是为了调节电动机的转速,有的是为了抑制过渡过程中的冲击电流,有的则是为了控制电动机的电功率以实现节能。然而,通过分析可以发现,它们的共同点是在控制策略实施中电动机均出现多种瞬态过程,包括 3 种两相不对称瞬态、1 种三相对称瞬态和 1 种定子端不接电源时的电机转子自由运动过程。

有关晶闸管-电动机系统及电动机的复杂瞬态,已经有很多文献进行了研究。这些文献大多是在时域中进行分析的^[2,4-5,9],仅部分文献在复数域中使用空间矢量对其进行探讨分析,但是使用的方法主要是解析计算法^[3,7-8,11]和 MATLAB/Simulink 模块仿真法^[12-13,17],还未有相关文献在复数域中对电动机各种复杂瞬态的状态方程和数值计算进行讨论。

由文献^[18-22]可知,空间矢量能够有效替代一组三相系统变量,且具有一定的物理意义,其轨迹能

收稿日期:2013-12-05;修回日期:2014-05-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51077048);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13XS06)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077048) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(13XS06)

Control strategy of inverter-based micro-sources in island mode

HU Wen, SUN Yunlian

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: As the traditional droop control strategy depends greatly on the droop coefficient and grid dynamic characteristics, an improved droop control strategy is proposed for the microgrid operating in island mode. The adaptive feedforward compensation is applied in the dynamic decoupling of micro-sources and microgrid to enhance the stability and robustness of dynamic system. The small-signal model is employed in the analysis of system stability and the recursive least-square identification algorithm is used in the operating point estimation to make the control system self-adaptive. The proposed control strategy is suitable for the parallel operation and power sharing of multiple inverter-based micro-sources. A simulation model of microgrid is built with MATLAB/Simulink and the simulative results show that, the proposed control strategy responds quickly to the variation of microgrid internal dynamic characteristics to prevent the system transient oscillation when the micro-sources are renewable energy generations.

Key words: microgrid; islanded operation; adaptive feedforward compensation; droop control; small-signal model; recursive least-square identification

够直观、简明地呈现瞬态中主要变量的变化规律,有利于电机复杂电磁瞬态的机理分析。其次,异步电动机对称及不对称空间矢量模型阶数均较低^[19],使用该模型有助于降低电动机状态方程的维数,从而可以简化晶闸管-电动机系统各瞬态过程的计算分析。基于以上 2 点,本文在复数域中使用空间矢量来研究晶闸管-电动机系统中的各种复杂瞬态问题,推导出不同瞬态下使用空间矢量描述的电动机状态方程,给出一种数值计算方法,并结合一个晶闸管-电动机系统应用实例,使用所推导的状态方程,在复数域中对其进行数值计算,并将计算结果与实测结果对比,来验证文中所提出的复数域数值计算方法的正确性。

1 晶闸管-电动机系统的复杂瞬态过程

晶闸管-电动机系统中的三相交流调压电路通常采用 2 个反并联的晶闸管作为一相电流的通断控制开关,其示意图如图 1 所示,图中,KM1、KM2 为接触器。

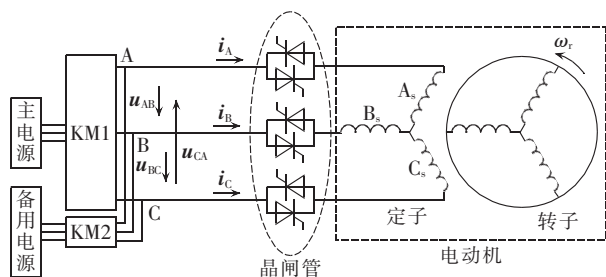


图 1 晶闸管-电动机系统电路示意图

Fig.1 Schematic diagram of SCR-motor system

通过对上文所述晶闸管-电动机系统的常见应用方式进行分析,可以发现它们的共同点是,在这些控制策略实施下电动机均出现多种复杂瞬态过程,并按一定规律交替出现。对晶闸管-电动机系统的常见应用方式,可归纳出在瞬态过程中电动机可能的运行状态,如表 1 所示。以一种简单的电源快速切换^[11-12]为例,当主电源出现故障并将其切除后,先将两相定子绕组切换到备用电源对应相上,再切换剩余相的定子绕组,从而实现在一个工频周期内完成电动机定子端供电电源的快速切换,在该过程中电动机运行状态变化见图 2,显然在此过程中电动机运行状态包括三相对称瞬态、两相不对称瞬态以及转子自由运动过程,并按照图 2 所示的顺序依次出现。

表 1 电动机可能的运行状态

Tab.1 Possible operating states of motor

运行类型	接上电源的定子端
三相对称	ABC
	BC
两相不对称	AB
	CA
零相(转子自由运动)	无

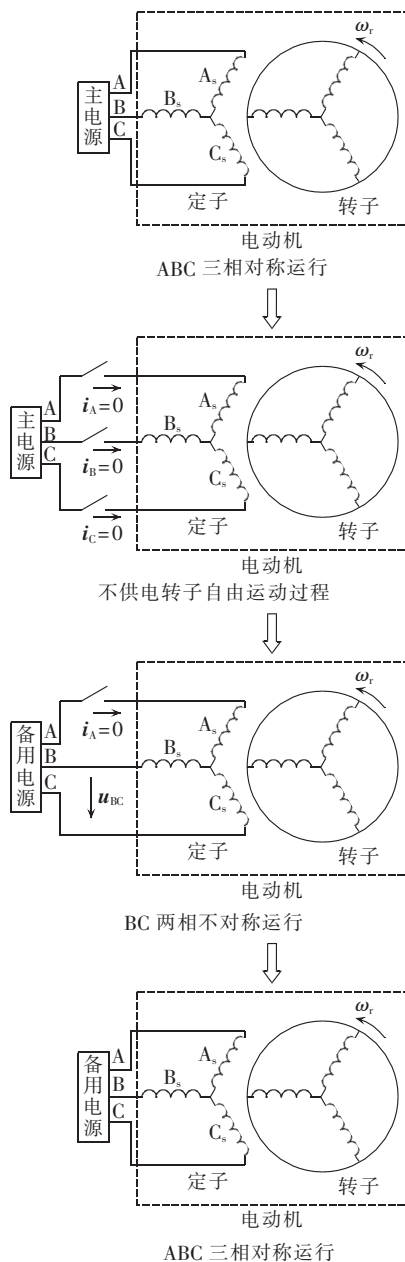


图 2 电源快速切换中电动机运行状态变化图

Fig.2 Variation of motor operating state during fast power supply changeover

2 复数域中不同瞬态下电动机的状态方程及其数值计算方法

2.1 基于空间矢量的电动机不同瞬态下的状态方程

由上文分析可知,晶闸管-电动机系统控制策略实施中,电动机交替出现多种瞬态运行。针对这些可能的运行状态,本节在前期工作^[19]的基础上,继续使用空间矢量,在复数域中进一步推导电动机不同瞬态下的状态方程。

对于电动机三相对称运行状态,选择定、转子电流空间矢量为状态变量。由文献^[18-19]可知,在定子复坐标系中,电动机对称运行下的空间矢量电压

方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s p \mathbf{i}_s + M_m p \mathbf{i}_r \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r + L_r (p - j\omega_r) \mathbf{i}_r + M_m (p - j\omega_r) \mathbf{i}_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{u}_s$ 为电源电压空间矢量; $\mathbf{i}_s$ 、 $\mathbf{i}_r$ 分别为定、转子电流空间矢量, 并且转子电流为折算到定子侧的折合值; R_s 、 L_s 分别为定子每相绕组电阻和总电感; R_r 、 L_r 分别为折合到定子侧的转子每相绕组电阻和总电感; M_m 为互感参数; ω_r 为转子电角速度; $p = d/dt$ 为微分算子。

在式(1)的基础上进行推导, 可得基于空间矢量描述的电动机在对称运行下的状态方程为:

$$p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} = \mathbf{A}_s \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s \sigma} \begin{bmatrix} 1 \\ -k_r \end{bmatrix} \mathbf{u}_s \quad (2)$$

$\mathbf{A}_s =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_r k_s k_r \right) & \frac{k_s}{\sigma} \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_r \right) \\ k_r \left[\frac{1}{\tau_s \sigma} + j\omega_r \left(\frac{k_s k_r}{\sigma} + 1 \right) \right] & \left(-\frac{k_s k_r}{\sigma} - 1 \right) \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_r \right) \end{bmatrix}$$

$$k_s = \frac{M_m}{L_s}, \quad k_r = \frac{M_m}{L_r}, \quad \tau_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad \tau_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{M_m^2}{L_s L_r}$$

对于电动机 3 种两相不对称瞬态状态, 选择定子电流空间矢量、转子电流空间矢量及其共轭分量为状态变量。由文献[19]可知, 在定子复坐标系中, 表 1 所示的 3 种两相不对称瞬态对应的空间矢量数学模型依次如式(3)~(5)所示。

$$\begin{cases} j \frac{2}{\sqrt{3}} \mathbf{u}_{BC} = 2R_s \mathbf{i}_s + 2L_s p \mathbf{i}_s + M_m p (\mathbf{i}_r - \mathbf{i}_r^*) \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r + L_r (p - j\omega_r) \mathbf{i}_r + M_m (p - j\omega_r) \mathbf{i}_s \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r^* + L_r (p + j\omega_r) \mathbf{i}_r^* - M_m (p + j\omega_r) \mathbf{i}_s \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{AB} = (1 - \alpha^2) R_s \mathbf{i}_s + (1 - \alpha^2) L_s p \mathbf{i}_s + \frac{1}{2} (1 - \alpha^2) M_m p \mathbf{i}_r + \frac{1}{2} (1 - \alpha) M_m p \mathbf{i}_r^* \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r + L_r (p - j\omega_r) \mathbf{i}_r + M_m (p - j\omega_r) \mathbf{i}_s \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r^* + L_r (p + j\omega_r) \mathbf{i}_r^* - \alpha^2 M_m (p + j\omega_r) \mathbf{i}_s \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{CA} = (\alpha - 1) R_s \mathbf{i}_s + (\alpha - 1) L_s p \mathbf{i}_s + \frac{1}{2} (\alpha - 1) M_m p \mathbf{i}_r + \frac{1}{2} (\alpha^2 - 1) M_m p \mathbf{i}_r^* \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r + L_r (p - j\omega_r) \mathbf{i}_r + M_m (p - j\omega_r) \mathbf{i}_s \\ 0 = R_r \mathbf{i}_r^* + L_r (p + j\omega_r) \mathbf{i}_r^* - \alpha M_m (p + j\omega_r) \mathbf{i}_s \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{u}_{BC}$ 、 $\mathbf{u}_{AB}$ 和 $\mathbf{u}_{CA}$ 为电源线电压; $\mathbf{i}_r^*$ 为转子电流空间矢量 $\mathbf{i}_r$ 的共轭分量; $\alpha = \exp(j2\pi/3)$ 。

对式(3)~(5)进行进一步推导, 可得基于空间矢量描述的电动机 3 种两相不对称瞬态下的状态方程分别为:

$$p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_r^* \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{as1} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_r^* \end{bmatrix} + \frac{j}{\sqrt{3} L_s \sigma} \begin{bmatrix} 1 \\ -k_r \\ k_r \end{bmatrix} \mathbf{u}_{BC} \quad (6)$$

$$p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_r^* \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{as2} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_r^* \end{bmatrix} + \frac{1}{(1 - \alpha^2) L_s \sigma} \begin{bmatrix} 1 \\ -k_r \\ \alpha^2 k_r \end{bmatrix} \mathbf{u}_{AB} \quad (7)$$

$$p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_r^* \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{as3} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \\ \mathbf{i}_r^* \end{bmatrix} + \frac{1}{(\alpha - 1) L_s \sigma} \begin{bmatrix} 1 \\ -k_r \\ \alpha k_r \end{bmatrix} \mathbf{u}_{CA} \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_{as1} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_s \sigma} & \frac{k_s}{2\sigma} s_3 & -\frac{k_s}{2\sigma} s_4 \\ k_r s_1 & -\left(1 + \frac{k_s k_r}{2\sigma}\right) s_3 & \frac{k_s k_r}{2\sigma} s_4 \\ k_r s_2 & \frac{k_s k_r}{2\sigma} s_3 & -\left(1 + \frac{k_s k_r}{2\sigma}\right) s_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{as2} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_s \sigma} & \frac{k_s}{2\sigma} s_3 & \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha^2} \frac{k_s}{2\sigma} s_4 \\ k_r s_1 & -\left(1 + \frac{k_s k_r}{2\sigma}\right) s_3 & -\frac{1 - \alpha}{1 - \alpha^2} \frac{k_s k_r}{2\sigma} s_4 \\ \alpha^2 k_r s_2 & \alpha^2 \frac{k_s k_r}{2\sigma} s_3 & -\left(1 + \frac{k_s k_r}{2\sigma}\right) s_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{as3} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_s \sigma} & \frac{k_s}{2\sigma} s_3 & \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha - 1} \frac{k_s}{2\sigma} s_4 \\ k_r s_1 & -\left(1 + \frac{k_s k_r}{2\sigma}\right) s_3 & -\frac{\alpha^2 - 1}{\alpha - 1} \frac{k_s k_r}{2\sigma} s_4 \\ \alpha k_r s_2 & \alpha \frac{k_s k_r}{2\sigma} s_3 & -\left(1 + \frac{k_s k_r}{2\sigma}\right) s_4 \end{bmatrix}$$

$$s_1 = \frac{1}{\tau_s \sigma} + j\omega_r, \quad s_2 = -\frac{1}{\tau_s \sigma} + j\omega_r$$

$$s_3 = \frac{1}{\tau_r} - j\omega_r, \quad s_4 = \frac{1}{\tau_r} + j\omega_r$$

对于电机不接电源时的转子自由运动过程, 以转子电流空间矢量为状态变量。定子绕组与电源完全断开后, 定子电流全部为零, 这时电机进入转子自由运动过程, 此时电机的电压方程则为:

$$0 = R_r \mathbf{i}_r + L_r (p - j\omega_r) \mathbf{i}_r \quad (9)$$

由此可得在复数域中该状态对应的状态方程为:

$$p \mathbf{i}_r = (-1/\tau_r + j\omega_r) \mathbf{i}_r \quad (10)$$

由式(2)、(6)~(8)可知, 基于空间矢量表示的电动机三相对称运行、两相不对称瞬态对应的状态方程分别是二阶、三阶, 与实数域中 abc 静止坐标系和 dq 坐标系下的电机对应状态方程相比, 显然复数域中的方程组阶数较低, 这一点有利于简化电动机复杂瞬态的数值计算和分析。

在复数域中对晶闸管-电动机系统的控制过程进行数值计算时, 不仅要考虑电机的电压方程, 还要考虑其转子机械运动方程:

$$p\omega_r = \frac{p}{J} (T_e - T_L) \quad (11)$$

其中, T_L 为负载转矩; T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量。 T_e 的计算公式为:

$$T_e = \frac{3}{2} L_m p \{ \mathbf{i}_r \times \mathbf{i}_s \} = \frac{3}{2} L_m p \operatorname{Im} \{ \bar{\mathbf{i}}_r \cdot \mathbf{i}_s \} \quad (12)$$

其中, $\bar{\mathbf{i}}_r$ 为 $\mathbf{i}_r$ 的共轭分量。

这样, 联立电压状态方程和运动方程, 就能够在

对晶闸管-电动机系统控制过程进行数值计算时,充分考虑电机转速变化,相比较基于空间矢量的解析法而言更加合理,因为解析法通常假设系统过渡过程中电机转速不变^[7-8,11]。

2.2 复数域数值计算方法

在复数域中,对晶闸管-电动机系统中的电机不同瞬态过程进行数值计算时,同样可以采用四阶龙格-库塔法^[23]。以式(2)所示的异步电动机三相对称运行下的状态方程为例,设时间为 t ,求解仿真步长为 Δt ,并假设状态变量列向量为 $\mathbf{x}$,其第 m 步($t=t_m$)时对应状态变量的值为 $\mathbf{x}_m$,则时间为 $t=t_m+\Delta t$ 时的状态变量为:

$$\mathbf{x}_{m+1} = \mathbf{x}_m + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \Delta t \quad (13)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$$

k_1, k_2, k_3 和 k_4 为增量变化率,计算公式为:

$$\begin{cases} k_1 = A_s \mathbf{x}_m + B_s \mathbf{u}_s(t_m) \\ k_2 = A_s (\mathbf{x}_m + \Delta t k_1 / 2) + B_s \mathbf{u}_s(t_m + \Delta t / 2) \\ k_3 = A_s (\mathbf{x}_m + \Delta t k_2 / 2) + B_s \mathbf{u}_s(t_m + \Delta t / 2) \\ k_4 = A_s (\mathbf{x}_m + \Delta t k_3) + B_s \mathbf{u}_s(t_m + \Delta t) \end{cases} \quad (14)$$

$$B_s = \frac{1}{L_s \sigma} \begin{bmatrix} 1 \\ -k_r \end{bmatrix}$$

3 电源快速切换过程的复数域数值计算及实验验证

本节以图2所示电动机供电电源快速切换为例,基于第2节所推导的复数域中的电动机状态电压方程和运动方程,使用四阶龙格-库塔法,在复数域中对电源快速切换过程中的电动机各瞬态过程依次进行数值计算。本文所用实验电动机为一台2.2 kW的笼型感应电动机,定子绕组星形联结、无中线,其主要参数为:额定电压 $U_N=380\text{ V}$,额定电流 $I_N=4.8\text{ A}$,定子电阻 $R_s=6.928\ \Omega$,折合到定子侧的转子电阻 $R'_r=7.369\ \Omega$,定子漏电抗 $x_{sl}=14.13\ \Omega$,激磁电阻 $R_m=36.25\ \Omega$,激磁电抗 $x_m=486.7\ \Omega$,极对数 $p_0=2$,转动惯量 $J=0.009\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。需要说明的是,将晶闸管-电动机系统的主电源切除后,定子三相电流并不是立刻变为零,因为晶闸管是过零关断的,所以可以认为系统主电源切除后,某一相定子绕组先电流过零关断,余下两相定子绕组在其电流过零点时再同时关断。结合图2可知,将系统供电电源从主电源切换到备用电源这个过程中,电动机的运行状态按如下顺序依次变化:三相对称稳态运行-短暂的两相不对称瞬态-转子自由运动-两相不对称瞬态-三相对称运行。

假设晶闸管-电动机系统于主电源A相电压过零点(由负到正)开始空载起动,运行1 s后,切除主电源,并在一个工频周期(20 ms)后,将电动机按快速切换控制策略切换到电压相位超前于主电源 120°

的备用电源上。使用第2节所推导的电机各种瞬态对应的状态方程,采用四阶龙格-库塔法对它们依次计算,前一状态的终值为下一状态的初值,于是,在复数域中可求出定、转子电流空间矢量,由此可进一步计算电磁转矩、转子角速度等其他电磁量,其中定子电流空间矢量轨迹如图3所示,电磁转矩和转子转速分别见图4和图5。再根据空间矢量和系统三相变量之间的变换关系^[18-19],可由复数域中计算的各空间矢量求出其对应的三相变量值,其中由此计算的定子三相电流波形如图6所示。

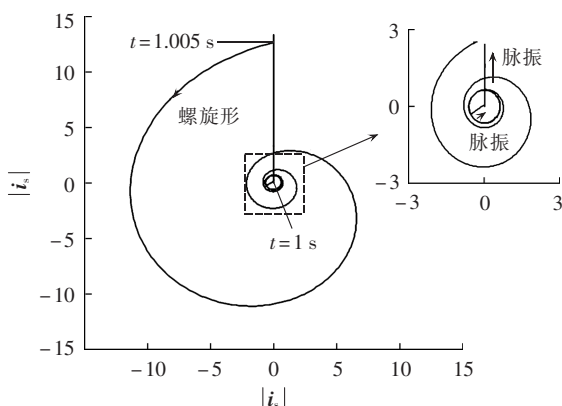


图3 极坐标下电源快速切换中定子电流空间矢量轨迹

Fig.3 Trajectory of stator current space vector during fast power supply changeover in polar coordinate

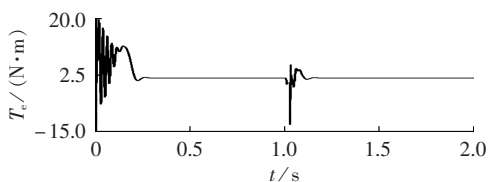


图4 电源快速切换中电磁转矩波形

Fig.4 Waveform of electromagnetic torque during fast power supply changeover

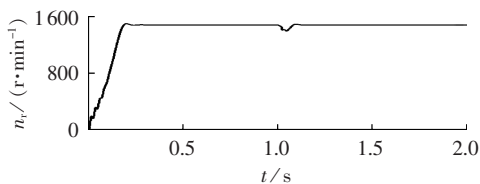


图5 电源快速切换中转子转速波形

Fig.5 Waveform of rotor speed during fast power supply changeover

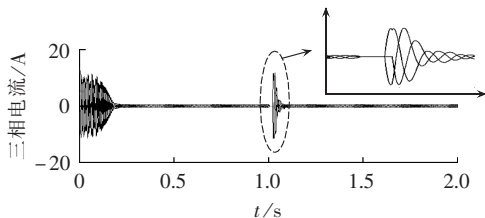


图6 电源快速切换中定子三相电流计算值
Fig.6 Calculated stator currents during fast power supply changeover

从图 3 中可以看出定子电流空间矢量在电源快速切换前后的变化规律,电动机接上主电源并启动完毕进入空载稳定运行时,定子电流矢量轨迹为一圆轨迹;当切除主电源后,定子电流矢量按脉振规律变化,至极坐标原点 0;然后当电动机按快速切换控制策略切换到备用电源上时,先将定子 B、C 两相绕组切换到备用电源上,这时电动机进入定子两相不对称瞬态,这一点可以从电源快速切换后定子电流时域波形(即图 6 中放大部分)中看出,然后再将定子 C 相绕组切换到备用电源上,这样,定子电流空间矢量就会呈现螺旋形变化,最后至稳态对应的圆轨迹上。显然,定子电流矢量轨迹既能反映电源切换过程中定子冲击电流的大小及其变化规律,又能体现出电动机的对应运行状态,这有利于对控制策略进行制定和改进。

此外,为了验证电动机电源快速切换中复数域数值计算的正确性,对系统的这种电源快速切换过程进行现场实测,其中定子电流实测波形如图 7 所示。通过图 6、7 可以发现,晶闸管-电动机系统的电源快速切换能够在 1 个工频周期内完成,且能够在一定程度上抑制定子电流冲击,因为同样情况下进行直接切换时冲击电流能够达到起动电流的 1.5 倍;基于电动机空间矢量状态方程,在复数域中进行数值计算求得的定子电流波形与实测结果基本一致,说明本文所提出的针对电动机复杂瞬态的复数域数值计算方法是正确的,从而也验证了文中所推导的电动机各种瞬态下的空间矢量状态方程是正确的。

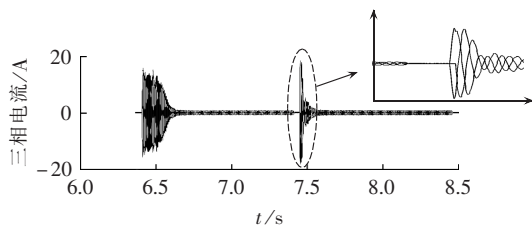


图 7 电源快速切换中定子三相电流实测波形
Fig.7 Measured waveform of three-phases stator currents during fast power supply changeover

4 结论

本文首先对晶闸管-电动机系统的常见应用方式进行了分析,归纳出系统控制策略实施中出现的电动机各种复杂瞬态;然后基于定义在复数域中的空间矢量,推导了电动机各种瞬态下的状态方程,并给出一种针对该系统复杂瞬态的复数域数值计算方法;最后以一种晶闸管-电动机系统的电源快速切换为例,使用所推导的状态方程,在复数域中依次计算电源切换过程中出现的电动机各种瞬态,并给出定子电流空间矢量轨迹变化图及其对应的三相电流波形,发现其与实测结果一致,从而验证了文中所得

到的状态方程和复数域数值计算方法的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 201-214.
- [2] SHEPHERD W, STANWAY J. The polyphase induction motor controlled by firing angle adjustment of silicon controlled rectifiers[C]//IEEE International Convention Record. New York, USA: [s.n.], 1964: 135-154.
- [3] ZHANG Zili, CUI Xueshen, ZHAO Haisen, et al. Research on a novel wye-delta soft start method of three-phase induction motor [C]//7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC). Harbin, China: [s.n.], 2012: 2479-2483.
- [4] ZENGINOBUZ G, CADIRCI I, ERMIS M, et al. Soft starting of large induction motors at constant current with minimized starting torque pulsations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1334-1347.
- [5] SUNDARESWARAN K, JOS B M. Development and analysis of novel soft-starter/energy-saver topology for delta-connected induction motors[J]. IEE Proceedings on Electric Power Applications, 2005, 152(4): 922-932.
- [6] 王毅, 赵凯岐, 徐殿国. 电机软起动控制系统中功率因数角的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 82-87.
WANG Yi, ZHAO Kaiqi, XU Dianguo. Research on displacement angle in the control system of the motor soft starter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 82-87.
- [7] CUI Xueshen, LUO Yingli, WU Ling, et al. The rapid soft re-switching technology of three-phase induction motors[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: [s.n.], 2008: 1053-1058.
- [8] 杨玉磊. 三相感应电机断电重合闸瞬态分析与控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
YANG Yulei. The reclosing transient analysis of three-phase induction motor after dumping and the research of control method [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008.
- [9] JAWAD F, GHANEEI M, KEYHANI A. Performance analysis of fast reclosing transients in induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(1): 101-107.
- [10] 崔学深, 罗应立, 周振华, 等. 感应电动机的电源快速软投入技术及其初始瞬态解析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 93-99.
CUI Xueshen, LUO Yingli, ZHOU Zhenhua, et al. Rapid soft re-switching technique of three-phase induction motors and its initial transient analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 93-99.
- [11] 李卫国, 崔学深, 罗应立, 等. 感应电机快速投入控制参数的解析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 154-160.
LI Weiguo, CUI Xueshen, LUO Yingli, et al. Analytical method on control parameter of quick switching on induction motor load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 154-160.
- [12] 吴玲. 感应电机在电源切换时分相投入控制的理论研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
WU Ling. Theoretical research on sequential phase switching control for bus transfer of induction motor [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.

- [13] 庞继伟. 重要电动机负载双电源软切换装置设计与控制方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- PANG Jiwei. Dual-power soft switching device and control method based on important induction motor loads[D]. Beijing: North China Electric Power University,2012.
- [14] LUO Yingli,CUI Xueshen,ZHAO Haisen,et al. A multifunction energy-saving device with a novel power-off control strategy for beam pumping motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2011,47(4):1605-1611.
- [15] 崔学深,罗应立,杨玉磊,等. 周期性变工况条件下异步电机节能机理和节能途径[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):90-97.
- CUI Xueshen,LUO Yingli,YANG Yulei,et al. Energy saving theory and approach for asynchronous motor under the periodically variable running condition[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(18):90-97.
- [16] 林文锋. 抽油机电机晶闸管调压节能技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- LIN Wenfeng. Research on oil-pumping unit motor's energy saving technology by voltage regulation with thyristor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2007.
- [17] 朱亮. 感应电动机固态星角软切换装置设计与控制方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
- ZHU Liang. Research on solid state wye/delta soft transform device of induction motor[D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [18] 汤蕴璆,张奕黄,范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005:49-52.
- [19] 李和明,张自力,崔学深,等. 晶闸管-电动机系统不对称瞬态建模及解析[J]. 电工技术学报,2013,28(8):241-249.
- LI Heming,ZHANG Zili,CUI Xueshen,et al. Asymmetrical transient modeling and analytical research of SCR-motor systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(8):241-249.
- [20] 张兴华,孙振兴,左厚贝. 感应电机空间矢量直接转矩控制系统效率优化[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):52-55.
- ZHANG Xinghua,SUN Zhenxing,ZUO Houbei. Efficiency optimization for space-vector direct torque control system of induction motor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):52-55.
- [21] 赵伟,王文,肖勇,等. 并联有源电力滤波器空间矢量电流控制新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):83-87.
- ZHAO Wei,WANG Wen,XIAO Yong,et al. Space vector current control of shunt active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):83-87.
- [22] 徐友,刘永超,郑建勇,等. 电网电压矢量定向的三相异步电机同步切换控制策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):82-86.
- XU You,LIU Yongchao,ZHENG Jianyong,et al. Synchronous switching control based on grid-voltage vector orientation for three-phase asynchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):82-86.
- [23] CHEE-MUN O. Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink[M]. [S.l.]:Prentice Hall PTR,1998:575-581.

作者简介:



崔学深

崔学深(1973-),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,主要研究方向为交流电机过渡过程分析与控制(E-mail:cxzs@ncepu.edu.cn);

张自力(1985-),男,安徽阜阳人,博士研究生,主要从事三相异步电动机电源快速软投入、软切换和交流电机过渡过程分析与控制等方面的研究工作(E-mail:zhangzili@ncepu.edu.cn);

李和明(1957-2014),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力电子变换技术、电机状态监测与故障诊断。

Numerical calculation of SCR-motor system complex transient in complex domain

CUI Xueshen,ZHANG Zili,LI Heming

(School of Electrical & Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: A numerical method is proposed to calculate the operational behavior of motor in complex domain according to its complex transients in the SCR-motor system with three-phase AC voltage regulation circuit,which,compared with the traditional numerical calculation in time-domain,makes full use of the low-order space vector model of motor to reduce the quantity of state variable and simplify the calculation of motor complex transients. Based on the mathematic space vector model of asynchronous motor,the state voltage equations of its various complex transients are deduced in complex domain. As an example,the deduced state equations are numerically calculated in complex domain with the fourth-order Runge-Kutta method for the fast power supply changeover of system to solve the trajectory of stator current space vector and the corresponding three-phase current waveform. The test results verify the correctness and feasibility of the proposed numerical calculation method and the deduced state equations.

Key words: SCR-motor system; transients; complex domain; space vector; state equation; calculations; electric motors