

感应电动机失电残压的研究及其对重合过程的影响

高吉增¹, 杨玉磊², 崔学深³

(1. 新泰市供电公司, 山东 新泰 271200; 2. 徐州市供电公司, 江苏 徐州 221005; 3. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 由于失电残压的存在, 对感应电动机进行重合闸或备用电源再投入操作时可能会引起大的冲击电流和冲击转矩, 对电源与电动机造成危害, 并引发线路保护误动及电能质量下降等问题。文章通过建立空间向量下的感应电动机模型来研究失电后电动机内部的电磁变化规律, 推导出了感应电动机的失电残压解析式, 并分析了电机在不同时刻恢复电源时引起的冲击电流与冲击转矩。

关键词: 感应电动机; 空间向量; 失电残压; 电源恢复

The research of the residual voltage of induction motor after dumping and its influence during restoration

GAO Ji-zeng¹, YANG Yu-lei², CUI Xue-shen³

(1. Xintai Electric Power Company, Xintai 271200, China; 2. Xuzhou Electric Power Company, Xuzhou 271200, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The residual voltage of induction motor after AC dump (RVACD) may probably result in inrush current and inrush torque when induction motor was reclosed or reswitched on the alternate power source, which would damage motor or bring power source problems such as mal-operation of feeder protection and voltage sag, etc. In this paper, the space vector based model of motor is used to research the RVACD so as to thoroughly analyze the varying laws of electrical qualities and magnetic field after dumping, deduce the analytical expression of residual voltage. The inrush current and torque are analyzed for power source to be restored at different moment after dumping.

Key words: induction motor; space vector; residual voltage; power restoration

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)04-0045-04

0 引言

工业领域内的很多重要负荷是由感应电动机组成。实际工作中, 因电源或其他故障问题, 引起感应电动机短时跳闸是常见的现象, 为保证此类重要负荷的不间断运行, 需要进行重合闸, 或是备用电源投入等电源恢复操作, 然而由于失电残余电压的存在, 电源恢复时可能会引起大的冲击电流和冲击转矩。冲击电流会引起供电母线电压骤降, 从而可能导致电力线路保护装置误动, 使电源投入操作失败; 冲击转矩会对电机定子线圈、负载造成危害; 同时谐波成分丰富也会导致电能质量下降, 危及同一供电母线电力电子设备工作的稳定性^[1-4]。当电动机容量较大时, 电源恢复引发的冲击电流对电源、电动机及负载的危害更为严重。

长期以来感应电动机的失电残压一直被作为一个物理概念来定性理解, 多数分析方法是利用稳态等效电路来近似表达电动机失电残压^[6], 也有些

是采用建立 ABC 或 dq 坐标系下感应电动机数学模型, 然后通过数值计算对失电残压进行分析^[2-5]。

文章采用空间向量法来建立降阶的感应电动机模型, 然后对电机失电后电磁变化进行研究, 从断电后转子的运动方程和磁链守恒原理出发, 数学推导出转子电流、转子磁链、定子磁链与定子侧残余电压的解析表达式。最后研究了电源恢复时, 失电残压对电源、电动机及负载的影响, 并给出了同相位与反相位时刻电源恢复引起的电流与转矩波形。

1 感应电机数学模型

空间向量法具有物理意义明确, 运算简洁等优点。为建立空间向量表示的感应电机模型, 下面以三相电流为例, 首先对空间向量简单说明。

1.1 空间向量

设三相电流瞬时值 i_a 、 i_b 、 i_c 合成的空间向量为 \hat{i} , $\hat{i} = 2(i_a + ai_b + a^2i_c)/3$, 模值为 $|\hat{i}|$,

$a = e^{j120^\circ}$, \hat{i} (论文中空间向量均用“^”标示) 为复的瞬时值。这种瞬时值之间的变换对于瞬态(动态)和任何波形都适用^[6]。

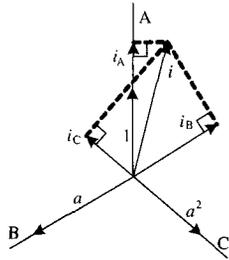


图 1 转子三相电流瞬时值与合成空间向量

Fig.1 Three-phase instantaneous rotor current and synthesized space vector

反之如图 1, 三相电流为合成空间向量 \hat{i} 在 ABC 三相轴上的投影再加上零序电流 \hat{i}_0 , 表示为:

$$\begin{cases} i_a = \text{Re}(\hat{i}) + \hat{i}_0 \\ i_b = \text{Re}(a^2 \hat{i}) + \hat{i}_0 \\ i_c = \text{Re}(a \hat{i}) + \hat{i}_0 \end{cases} \quad (1)$$

可见电流的三个变量可以用一个空间向量来表示, 同样, 电压、磁链等量也可以用空间向量的形式表示出来, 从而使电机的模型以及数值运算得到简化。

1.2 空间向量表示的电动机模型

设鼠笼式感应电动机定子绕组星接, 转子等效星接, 如图 2 所示, 则感应电机用空间向量表示时, 建立在定子复坐标下的定、转子的电压、磁链方程^[6]为:

$$\hat{u}_s = R_s \hat{i}_s + p \hat{\psi}_s \quad (2)$$

$$0 = R_r \hat{i}_r + (p - j\omega_r) \hat{\psi}_r \quad (3)$$

$$\hat{\psi}_s = L_s \hat{i}_s + M_m \hat{i}_r \quad (4)$$

$$\hat{\psi}_r = M_m \hat{i}_s + L_r \hat{i}_r \quad (5)$$

转矩与运动方程为:

$$\begin{cases} T_e = \frac{3}{2} p_0 \hat{\psi}_s \times \hat{i}_s = T_L + R_\Omega \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega = p_0 \Omega \end{cases} \quad (6)$$

以上各式中: $\hat{u}_s, \hat{i}_s, \hat{\psi}_s$ 分别为定子电压、定子电流、定子磁链; $\hat{i}_r, \hat{\psi}_r$ 分别表示转换到定子复坐标系中的转子电流和转子磁链, $\hat{i}_r = \hat{i}_r e^{j\theta}, \hat{\psi}_r = \hat{\psi}_r e^{j\theta}$; $\hat{i}_r, \hat{\psi}_r$ 分别为转子复坐标系中转子电流和转子磁链; 电角度 θ 为转子 a 相轴线与定子 A 相轴线的夹角, T_e, T_L 为电磁转矩及负载转矩; p_0 为电机极对数; ω 为定子电压角频率; Ω 为转子机械角速度; p 为时间的微分算子, $p = d/dt$ 。

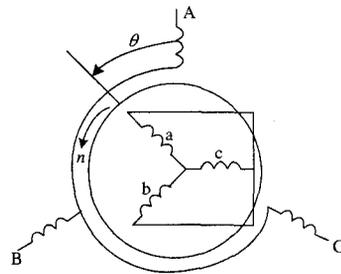


图 2 感应电动机等效图

Fig.2 Induction motor equivalent diagram

2 感应电动机的失电残压

失电残压产生的原因是电动机定子侧电源断开后, 定子电流变为零, 为保持电动机内磁场能量不跃变, 转子回路中会产生瞬时感生电流, 抵消定子电流消失引起的磁通变化以维持磁通不突变, 这一电流按转子绕组时间常数衰减, 是缓变的直流电流, 其产生的磁场, 相对定子绕组以转子转速旋转, 在定子绕组中感生出电动势, 即感应电动机的失电残压。

下面首先从电动机内部磁链守恒原理出发, 推导出失电后转子电流表达式, 求出电动机定子磁链, 从而得到电磁暂态下的失电残压, 然后根据电动机转动惯量及负载特性确定失电后电机转速变化规律, 从而得到最终的电动机失电残压解析式。

2.1 断电后的转子电流

设 $t=0$ 时刻投入电网, 经过一段时间电动机进入稳态, $t=t_1$ 时刻定子三相同步断电, 断电后定子电流为零, 为保持主磁路磁链不能突变, 由于转子电流没有零序分量, $\hat{i}_0 = 0$, 所以由转子的电压方程, 可得转子复坐标系下的转子电流空间向量:

$$\begin{aligned} \hat{u}_r &= R_r \hat{i}_r + L_r \frac{d\hat{i}_r}{dt} = 0 \\ \Rightarrow \hat{i}_r &= \hat{I}_{r1} e^{-\frac{t-t_1}{T_r}} = \left| \hat{I}_{r1} \right| e^{j\lambda - \frac{t-t_1}{T_r}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $T_r = L_r / R_r$, 为转子电路时间常数; \hat{I}_{r1} 为 $t = t_1^+$ 时刻转子电流空间向量的初始值, 可以通过断电前后磁链不跃变来求得^[9], 其中 $\left| \hat{I}_{r1} \right|$ 为模值, λ 为相角。

这样, t_1 时刻后任意 t 时刻的定子复坐标下转子电流空间向量为:

$$\hat{i}_r = \hat{i}_r e^{j\theta} = \hat{I}_{r1} e^{-\frac{t-t_1}{T_r}} e^{j\theta}, \text{ 模值为 } \left| \hat{I}_{r1} \right| e^{-\frac{t-t_1}{T_r}}.$$

式中: $\theta = \omega_r t + \theta_0$, 为转子 a 相轴线与定子 A 相轴线的夹角; θ_0 为断电时刻两轴线夹角; ω_r 为转子电角速度。

2.2 定子磁链与失电残压

根据式(4), 由于电动机失电后定子电流为零,

可得其失电残压: $\hat{u}_s = -\hat{e}_s = p\hat{\psi}_s$, 化简式(3)~(5), 并对磁链求导得:

$$p\hat{\psi}_s = \left(L_s - \frac{M_m^2}{L_r} \right) p\hat{i}_s + j\omega_r \frac{M_m^2}{L_r} \hat{i}_s + \left(j\omega_r - \frac{1}{T_r} \right) M_m \hat{i}_r$$

所以:

$$\hat{u}_s = M_m \left| \hat{I}_{r1} \right| \left(j\omega_r - \frac{1}{T_r} \right) e^{j\lambda + j\theta - \frac{t-t_1}{T_r}} \quad (8)$$

这样根据式(1)可以得到 ABC 三相相电压:

$$u_A = M_m \left| \hat{I}_{r1} \right| e^{-\frac{t-t_1}{T_r}} \sqrt{\omega_r^2 + \frac{1}{T_r^2}} \cos(\omega_r t + \theta_0 + \varphi + \lambda) \quad (9)$$

u_B, u_C 依次滞后 u_A 120° 。

式中: $\varphi = \arctan(-T_r \omega_r)$; $\omega_{r0} = \frac{\pi n_{r0} p_0}{30}$ 为断电时刻转子角转速。

根据电动机负载的不同, 由式(6)可以确定电动机转子角速度, 从而由式(8)得到电动机失电残压。

由所得残压解析式可知, 残压幅值是由转子转速和转子电流大小共同决定的; 残压频率由转子转速决定。

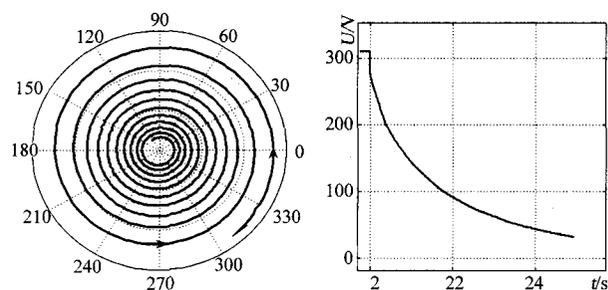


图3 残压空间向量极坐标图、幅值图

Fig. 3 Residual voltage space vector polar and magnitude graph

3 残压对电源恢复过程的影响

由上述分析可知, 感应电动机失电后, 其残压的幅值与频率均缓慢衰减。短时间内进行重合闸, 或是备用电源投入等电源恢复操作时, 加在电机上的电压可能会很大, 从而会引起较大的冲击电流与冲击转矩。

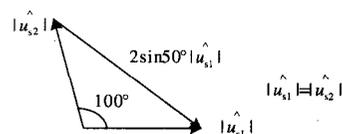


图4 电机定子端电压与备用电源电压关系图

Fig. 4 The relation of stator terminal voltage and alternate power source

下面以备用电源投入为例来研究失电残压对电源恢复的影响。已知感应电动机正常工作时, 电机定子端电压 \hat{u}_{s1} 的相位滞后备用电源电压 \hat{u}_{s2} 100° , 向量之差幅值为 $2 \sin 50^\circ \left| \hat{u}_{s1} \right|$, 如图4所示。

当感应电动机在 2 s 失电后, 随着失电残压 \hat{u}_s 幅值与频率的不断衰减, 它与备用电源电压 \hat{u}_{s2} 之间的相位差、向量差的幅值也不断变化, 如图5所示。 \hat{u}_s 与 \hat{u}_{s2} 之间的相位差为 180° 左右时, 二者空间向量差的幅值达到峰值, 加在电机定子端上电压幅值比正常工作电压大; 而同相位时, 二者空间向量差的幅值则较正常工作电压小。

图6为不同时刻电源恢复时, 电流 I 的空间向量幅值的标幺值曲线, 可见, 反相位时刻电源恢复时, 曲线a的电流峰值为额定电流的近10倍, 这样大的冲击电流, 会产生很大的电磁干扰, 影响电网内其它电子设备正常工作, 同时会造成母线电压骤降, 极易引起系统线路保护动作, 导致电源恢复操

作不成功。而同相位时刻电源恢复引起的总电流曲线 b 中, 电流峰值仅为额定电流的 2 倍多, 比起动电流还要小。可见, 电源恢复时刻的选择十分重要, 同相位时刻进行电源恢复比较有利。同时, 电动机的过电流产生的大的电磁力容易使电机定子端部线圈产生变形, 损害绝缘, 危害电动机安全运行。

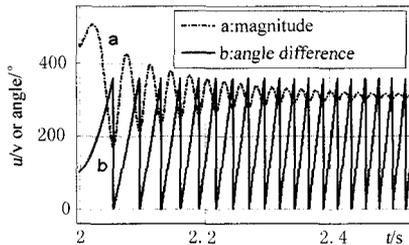


图 5 残压与待投入电源电压空间向量差幅值

Fig. 5 The space-vector vector difference magnitude between residual voltage and alternate power source

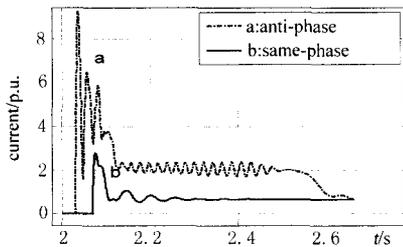


图 6 电动机电流 / 空间向量幅值

Fig. 6 The space-vector magnitude of induction motor current I

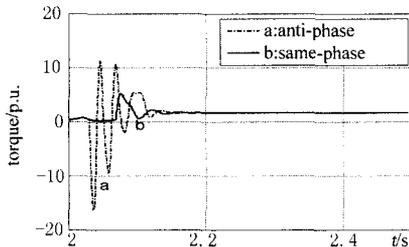


图 7 电动机电磁转矩曲线

Fig. 7 The electromagnetic torque curve of induction motor

图 7 为电动机的电磁转矩标幺值曲线。反相位时刻电源恢复时的电磁转矩曲线 a 中, 电磁转矩首半波峰值达到额定转矩的 15 倍多且与转子转向相反, 同相位时刻电源恢复时的电磁转矩曲线 b 中, 转矩峰值约为额定转矩的 5 倍, 且与转子转向相同。可见反相位时刻的电源投入会引起的高峰值的反向转矩, 会对电动机转轴与负载造成很大冲击。

对比图 5~图 7 可见, 电源恢复引起冲击电流大小由合闸时刻残压 \hat{u}_s 与备用电源 \hat{u}_{s2} 向量差的幅

值大小决定, 而电磁转矩首半波的正负由合闸时刻 \hat{u}_s 与 \hat{u}_{s2} 相位差决定, 同相位范围首半波为正向转矩, 反之则为反向。

因此为保证电源恢复操作成功, 避免不利时刻电源投入危害电源、电动机及负载, 应当尽量避免在失电残压与待投入电源反相位时投入。

4 讨论与结论

(1) 利用空间向量法建立感应电机模型, 物理意义更为明确, 可使电机模型降阶, 数值运算得到很大简化。

(2) 电机残压的频率由转子转速决定, 幅值由失电时刻转子电流初值、转子衰减时间常数和电机转速共同决定。

(3) 残压与投入电源同相位时刻进行电源恢复, 引起冲击电流较小, 反相位时刻引起得冲击电流很大。

(4) 电磁转矩首半波的正负由合闸时刻残压与投入电源的相位差决定, 同相位范围首半波为峰值较小的正向转矩, 反之则为反向高峰值转矩。

论文通过对失电残压的分析, 可以便捷、准确地得到感应电动机类负荷失电残压变化的动态过程。深入了解感应电动机类负荷失电残压特性也可为此类负荷的断电重合、备用电源投入等电源恢复操作预期合适投入时刻, 为判断实时检测到的投入时刻是否正确提供依据。

参考文献

[1] 马宏忠, 胡虔生, 张利民, 等. 异步电机的失电残余电压研究[J]. 中小型电机, 2005, 32 (5) :3-5.
 MA Hong-zhong, HU Qian-sheng, ZHANG Li-min, et al. Research on Residual Voltage of AC Motor after Dumping[J]. S&M Electric Machines, 2005, 32 (5):3-5.

[2] 汪雄海. 电机电源切换冲击扰动机理分析及保护[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002,36(1):97-100.
 WANG Xiong-hai. Study on Transient Response Due to Fast Reclosing of the Electrical Sources of the Motor[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2002,36(1):97-100.

[3] 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.
 TANG Yun-qi, ZHANG Yi-huang, FAN Yu. AC Motor Dynamic Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[4] Yuji Akiyama. Asynchronous Motor Residual Voltage[A]. In: IEEE Industry Applications Society Annual Meeting[C]. 1990.

- 应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 69-70.
QIAN Yu-shu, CUI Heng-zhi, et al. Design and Application of AGC System Adapting to CPS Standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11):69-70.
- [3] 李瑞超, 江山立, 陈家庚, 等. AGC机组调节效能定量评估与补偿方式研究[J]. 电网技术, 2001, 25(8): 15-19.
LI Rui-chao, JIANG Shan-li, CHEN Jia-geng, et al. Quantitative Evaluation of Regulation Efficiency of Generating Sets with AGC and Study on the Compensation Modes[J]. Power System Technology, 2001, 25(8):15-19.
- [4] 言茂松, 邹斌. 概率学的AGC先验定价和后验考核新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 1-6.
YAN Mao-song, ZOU Bin. A New Method of Probability Prior Pricing and Posterior Assessment for AGC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 1-6.
- [5] 武亚光, 李卫东, 吴海波, 等. 我国发电侧电力市场中AGC机组的调配框架[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 37-40.
WU Ya-guang, LI Wei-dong, WU Hai-bo, et al. Framework of AGC Unit Selection on the Generation-sided Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 1-6.
- [6] 徐兴伟, 林伟. 互联电网控制性能标准下自动发电控制策略的选择[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 32-34.
XU Xing-wei, LIN Wei. Selection of Automatic Generation Control Strategy Under Control Performance Standard for Interconnected Power Grids[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 32-34.
- [7] 丁玉凤. 粒子群优化算法及其在电力系统经济运行中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
DING Yu-feng. Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications to Power System Economic Operation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [8] 郑延海, 张小白, 钱玉妹, 等. 电力系统实时安全约束调度的混合算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 49-52.
ZHENG Yan-hai, ZHANG Xiao-bai, QIAN Yu-mei, et al. Hybrid Algorithm for Real-time Security Constrained Dispatch of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 49-52.
- [9] 赵学顺, 甘德强, 文福拴, 等. 计及联络线功率偏差处罚的AGC容量获取与调节策略[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 18-20.
ZHAO Xue-shun, GAN De-qiang, WEN Fu-shuan, et al. Determination of AGC Capacity Requirement and Regulation Strategies Considering Penalties of Tie-line Power Flow Deviations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23):18-20.

收稿日期: 2008-04-16

作者简介:

张光烈(1965-), 男, 研究方向为电力系统控制;

郭伟(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: piazi_99@163.com

姜世金(1970-), 男, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。

(上接第 48 页 continued from page 48)

- [5] 邓建国. 三相异步电动机瞬间断电重合闸瞬态分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(1):37-41.
DENG Jian-guo. Transient Analysis on Reclosing of Three-phase Asynchronous Motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1):37-41.
- [6] 黄滨, 张晓锋, 邓大新. 舰船电力系统转换供电重合闸的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 28(3):318-321.
HUANG Bin, ZHANG Xiao-feng, DENG Da-xin. Modeling and Analyzing of Switch Supply's Reclosing in Warship's Power System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 28(3):318-321.
- [7] 汤晓燕. 三相感应电动机瞬态断电重新投入电网时的瞬态[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2):98-102.
TANG Xiao-yan. Reclosing Transient of Three-phase Asynchronous Motor[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(2):98-102.
- [8] Shaltout A, Al-omoush M. Reclosing Torques of Large Asynchronous Motors with Stator Trapped Flux[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11 (1):84-90.
- [9] Beckwith T R, Hartmann W G. Motor Bus Transfer: Considerations and Methods[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2006, 42(2):602-611.
- [10] Woudstra J B, Ddlerli W. Re-switching of an Asynchronous Motor with Remainder Flux[A]. In: Third International Conference on IEEE Power Electronics and Variable-Speed Drives[C]. 1988.452-455.

收稿日期: 2008-04-17; 修回日期: 2008-07-10

作者简介:

高吉增(1983-), 男, 调度专工, 从事继电保护与运行方式工作; E-mail: cumtyy1@126.com

杨玉磊(1982-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护、电机节能控制研究;

崔学深(1973-), 男, 副教授, 从事电力系统稳定性、电机控制与节能技术方面的研究。