

电能质量扰动对异步电动机特性影响的分析与仿真研究

李国栋¹, 金焱², 顾强¹, 徐永海²

(1. 天津电力科学研究院, 天津 300022;

2. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要: 建立了不同电能质量扰动情况下异步电动机的模型, 分别在理想供电电压、三相电压不平衡、电压畸变、电压偏差与电压暂降情况下, 对异步电动机的工作特性进行了分析, 对异步电动机转矩、转速以及运行效率等与不同程度电能质量扰动之间的关系进行了仿真研究, 并对有与无相位跳变、发生单相以及三相电压暂降时, 电动机转矩与转速的变化进行了详细分析。结果表明, 在非理想情况下, 电机的输出转矩中会出现不同程度的脉动或振荡转矩, 电机的启动时间与转速等均会发生变化, 从而对电机运行带来不利影响。

关键词: 电能质量; 异步电动机; 转矩; 转速; 仿真

Analysis and simulation of power quality disturbance impacts on performance of asynchronous motor

LI Guo-dong¹, JIN Yan², GU Qiang¹, XU Yong-hai²

(1. Tianjin Electric Power Science & Research Institute, Tianjin 300022, China; 2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Under Ministry of Education, NCEPU, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper establishes the mathematical model of asynchronous motor related to the different power quality disturbances first. And then the performances of asynchronous motor under ideal voltage condition, three-phase unbalanced voltage, voltage distortion, voltage deviation and voltage sag are investigated. Detailed simulation researches are carried on to analyse the relationship of asynchronous motor torque, speed and efficiency with different degree power quality disturbances. Meanwhile, detailed analysis for the variation of the motor torque and speed is given with and without phase-angle-jump for single-phase and three-phase voltage sag. The results show that the output torque of the motor has different degree pulsating or oscillating components, as well the starting time and speed will change. Attention should be paid attention to the bad effects the asynchronous motor with power quality disturbances.

Key words: power quality; asynchronous motor; motor torque; motor speed; simulation

中图分类号: TM343

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)02-0049-06

0 引言

具有非线性、冲击性和不平衡特性的负荷在国民经济各部门中的应用越来越多, 这些用电设备工作时会造成不同程度的供电网电能质量的恶化, 其带来的问题反过来又会对其本身或其它用电设备产生不利影响^[1]。因此, 研究用电设备在不同电能质量扰动下的工作特性非常必要。

在机械制造业、冶金工业、煤炭工业、石油工业、轻工业及其它工矿企业中, 三相异步电动机得到了广泛应用^[2]。在电网中异步电动机占交流电动机的90%以上, 占电网总负荷的60%以上^[3]。因此, 异步电动机的特性如转矩、转速、定转子电流等在不同电能质量扰动下的变化情况的研究显得尤为

重要^[4-7]。

针对电能质量扰动对异步电动机影响的问题, 目前的研究主要侧重于电压偏差、谐波与三相不平衡情况下某些问题的研究^[3-7], 存在着对电机重要性考虑不够全面, 以及很少涉及电压暂降对异步电动机影响的分析等问题。为此, 本文建立了三相异步电动机的仿真模型, 详细研究了异步电动机在电压偏差、谐波、三相不平衡及电压暂降情况下的运行特性, 对异步电动机的转矩特性、运行效率等进行了分析。

1 异步电动机的等效电路

在不同的电能质量扰动情况下, 异步电动机应考虑相应的模型。下面以三相不平衡为例, 给出异

步电动机的等效电路模型。

异步电动机在不平衡电压下运行,正、负序电压加在定子绕组上分别产生正、负序电流,并产生正、负序旋转磁场。如转子对正序旋转的转差率为 s ,则对负序磁场的转差率为

$$s_{(2)} = \frac{n_1 + n}{n_1} = \frac{n_1 + (1-s)n_1}{n_1} = 2-s \quad (1)$$

式(1)中: n_1 为定子正序磁场的转速; n 为转子的转速。

由于异步电动机的阻抗随着转差率而变化,故对于正序电流和负序电流有不同的阻抗,其等效电路分别如图1和图2所示。

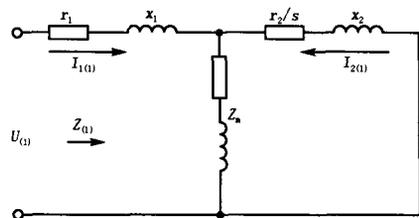


图1 异步电动机正序等效电路

Fig.1 Positive sequence equivalent circuit of asynchronous motor

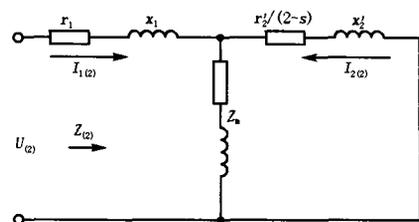


图2 异步电动机负序等效电路

Fig.2 Negative sequence equivalent circuit of asynchronous motor

图1和图2中, r_2 为当转子电流的频率为 sf_1 时的转子电阻, r_2' 为当转子电流频率为 $(2-s)f_1$ 时的转子电阻。由于集肤效应产生的影响, r_2' 常较 r_2 为大。而漏抗 x_2' 因集肤效应,一般要略小于 x_2 。

可求得正、负序转矩分别为:

$$M_{(1)} = \frac{p}{\omega_1} I_{2(1)}^2 \frac{r_2}{s} \quad (2)$$

$$M_{(2)} = -\frac{p}{\omega_1} I_{2(2)}^2 \frac{r_2'}{2-s} \quad (3)$$

式(2)与式(3)中, p 为电机的对数, ω_1 为同步角频率。

负序电流所产生的转矩起着制动作用。电动机的总转矩为:

$$M = \frac{p}{\omega_1} \left[I_{2(1)}^2 \frac{r_2}{s} - I_{2(2)}^2 \frac{r_2'}{2-s} \right] \quad (4)$$

对谐波、电压偏差以及电压暂降情况下异步电动机的等效电路模型也应分别考虑。如对谐波情况下的等效模型,当不考虑铁心磁饱和及非线性等因素的影响时,可利用叠加原理,把电源中的谐波分量看成是一系列独立的成分,分别加到电机绕组上。对于电压暂降,可考虑采用与电压偏差情况下相同的等效模型。

2 不同电能质量扰动情况下异步电动机特性的仿真分析

仿真分析中采用的异步电动机为三相鼠笼式异步电动机,其技术参数见表1。针对所要进行的不同电能质量情况下的异步电动机运行特性分析,考虑到电机定子绕组会出现不对称运行状态,本文采用坐标轴选在定子绕组上的 $\alpha\beta 0$ 坐标系下的电机数学模型,建立了 $\alpha\beta 0$ 坐标系下电压方程、磁链方程和转矩方程的仿真模型。仿真研究在负荷转矩 $T_L = 14.59 \text{ N}\cdot\text{m}$ 为定值的情况下进行。

表1 异步电动机模型参数表

Tab.1 Asynchronous motor parameters

异步电动机模型	单位	数值
额定功率	kW	2.2
额定电压	V	380
额定电流	A	4.81
接线方式	—	Δ
额定转速	rpm	1 440
定子自感	H	1.595
定子漏感	H	0.045
定子电阻	Ω	6.933
转子漏感	H	0.045
转子电阻	Ω	7.396
定转子互感	H	1.55
转动惯量	J	0.02

2.1 理想情况下仿真分析

三相异步电动机全相运行时,理想情况下定子电流波形、转速波形和转矩波形如图3所示。

理想情况下,异步电动机在接近2s时转速达到稳定,在此之前的暂态过程对应于电动机转速逐渐上升的启动过程。在启动过程之后,定子相电流波形为标准的正弦波形,电机转速平稳,且输出电

磁转矩平稳, 电机处于稳定运行状态。

转矩波动幅度也随之增大。表 2 给出了相应的仿真分析结果。

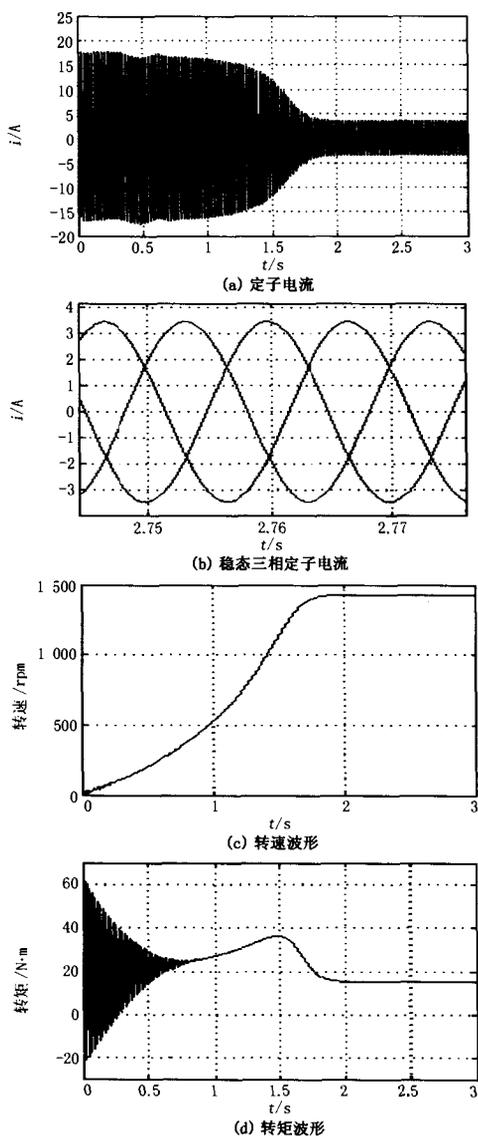


图 3 理想情况下仿真波形

Fig.3 Simulation waveform under ideal conditions

2.2 三相不平衡情况下仿真分析

不平衡度为 2% 时, 异步电动机的定子电压、电流、转矩波形如图 4 所示。

由于电压的不对称, 造成了三相定子电流中的某一相电流偏大, 如图 4(b) 所示, 使得定子的铜损增加, 电机效率下降。在恶劣情况下会加速绝缘的老化, 造成电机过电压, 甚至烧毁电机。在三相不平衡时, 其负序会与气隙磁场作用产生不同方向与大小的转矩, 其转矩值正负交替变化, 从而产生脉动转矩, 其波形如图 4(c)。图 4(d) 为稳态时放大的了的脉动转矩波形。

随着不平衡度的增大, 异步电动机的输出电磁

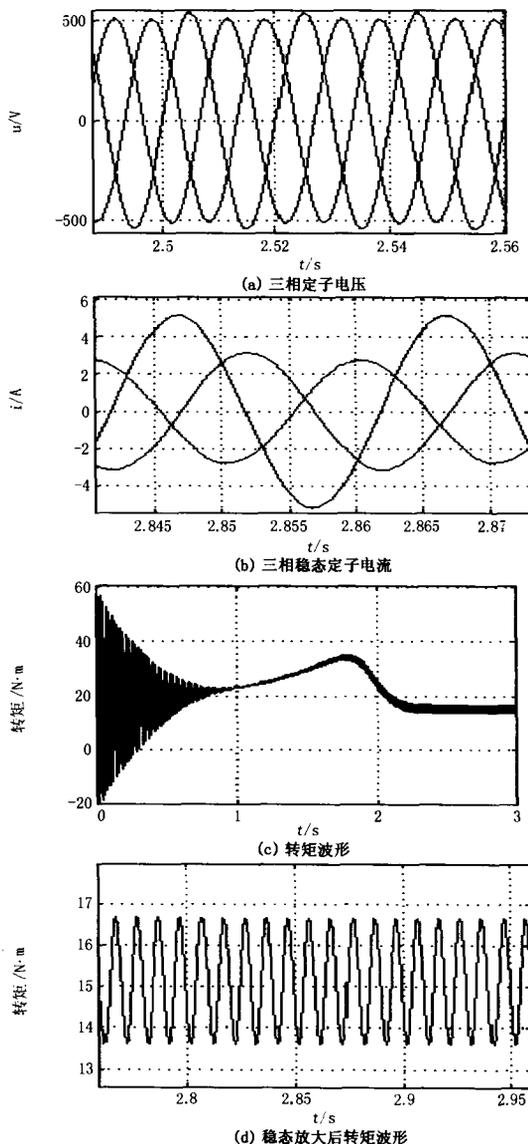


图 4 不平衡情况下仿真波形

Fig.4 Simulation waveform under unbalanced conditions

表 2 转矩峰值、振荡幅度及频率变化

Tab.2 Peak value of torque, oscillation amplitude and frequency

不平衡度 ε_u / (%)	稳态时转矩最大峰值 / (N·m)	稳态时转矩最小峰值 / (N·m)	振荡幅度 / (N·m)	频率 / Hz
1.463	16.25	14.01	2.24	100
1.694	16.42	13.88	2.54	100
1.933	16.58	13.72	2.86	100
2.185	16.87	13.52	3.35	100
2.370	16.90	13.40	3.50	100

2.3 电压畸变情况下仿真分析

实际的供电系统电压中一般都含有不同程度畸变率的谐波成分。图 5 所示为主要含 5、7、11 次谐波，电压谐波总畸变率为 12.12% 时的仿真结果。

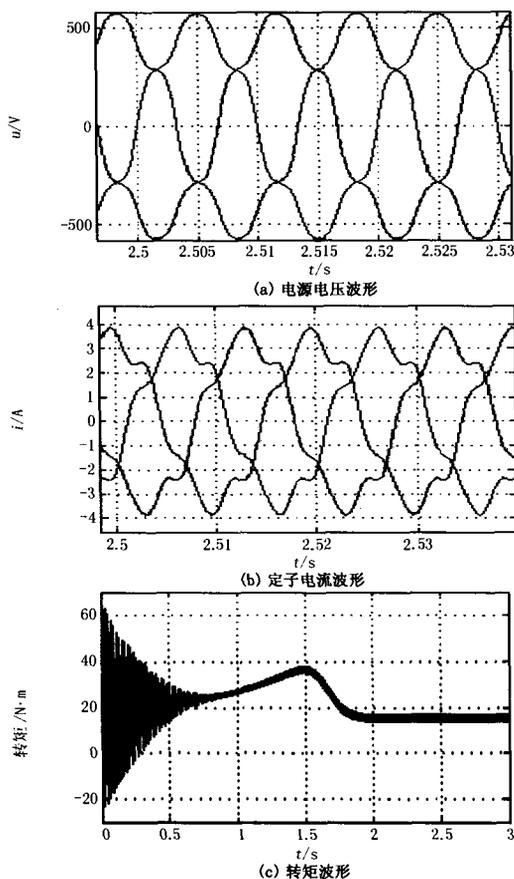


图 5 谐波畸变情况下仿真波形

Fig.5 Simulation waveform under harmonic distortion conditions

谐波电流的存在，使得电机产生了附加的额外损耗，包括铁损及铜损。同时不同频率的转子谐波电流与气隙磁场相互作用会产生不同方向、大小的转矩，转矩值做正负交替变化，形成脉动，其平均值为零。电机输出转矩波形如图 5(c) 所示。应注意，5、11 次谐波产生的为负序转矩，而 7 次谐波产生的为正序转矩，同次的正、负序谐波转矩会相互抵消。因此，谐波转矩的大小不仅与谐波畸变程度有关，而且与所含有的谐波成分及其大小有关。

2.4 电压偏差情况下仿真分析

图 6 给出了在电压偏差情况下的仿真波形。

在 1.1 倍额定电压下，电机在接近 1.3 s 时达到稳定运行，而 0.9 倍额定电压下，接近 3.6 s 才能达到稳定，其启动过程大于前者。异步电动机如果长期处于低电压运行，会造成电动机绕组绝缘老化，甚至烧坏绕组，使电动机的使用寿命降低。当异步电动机的端电压过高时，由于磁路饱和，励磁电流增加很快，也会使定、转子电流增大，损坏绕组绝缘。

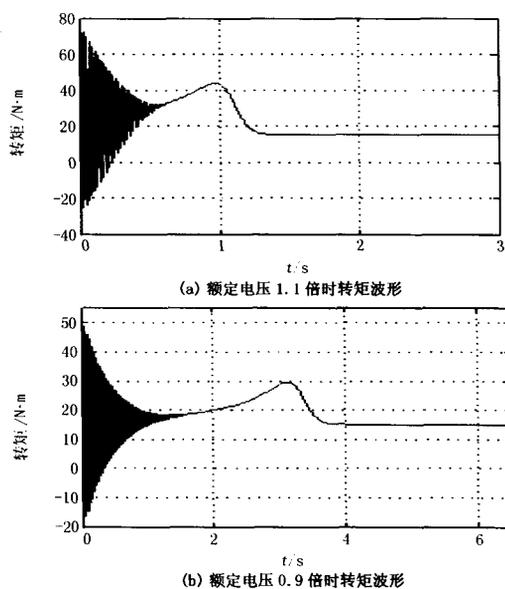


图 6 电压偏差情况下仿真波形

Fig.6 Simulation waveform under voltage deviation conditions

2.5 电压暂降情况下仿真分析

在国外许多发达国家，电压暂降是最重要的电能质量问题。在我国，近年来电压暂降也日益引起人们的关注。研究电压暂降情况下异步电动机的运行特性具有重要的意义。

2.5.1 单相电压发生暂降（无相位跳变）仿真分析

假设异步电动机 A 相电源在 2.5~2.6 s 时发生不同程度的电压暂降，但其相位不发生跳变，B、C 相电压正常，电机转速与转矩波形如图 7(a)、(b) 所示。

由图 7(a)、(b) 可知，电压暂降至 90% 时，电机转速有小幅下降，电压暂降至 60% 时，转速下降的幅度增加。由于此时电机运行在三相不平

衡状态, 电机输出转矩如图 7(c)、(d)发生振荡, 机的振动。其振荡幅度随暂降幅度的增大而增大。

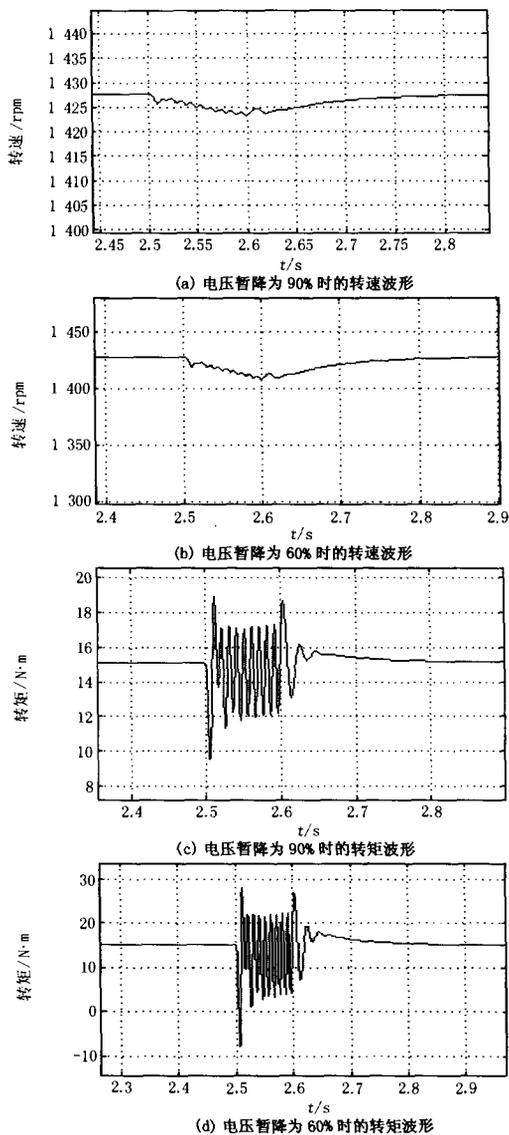


图 7 无相位跳变不同电压暂降时仿真波形

Fig.7 Simulation waveform under voltage sag without phase angle jump

2.5.2 单相电压发生暂降 (有相位跳变) 仿真分析

A 相在 2.5~2.6 s 电压暂降至正常的 90% 和 60%, 相位突变 60°, B、C 相电压正常, 电机转速与转矩波形如图 8 所示。

与单相无相位跳变电压暂降相比, 由于电机不对称运行条件更加恶劣, 电机转速下降更多, 并且有波动, 如图 8(a)、(b)所示。而电机输出转矩在暂降发生时刻有一较大负转矩, 如图 8(c)、(d)所示, 其对电机冲击很大, 严重时会引起电

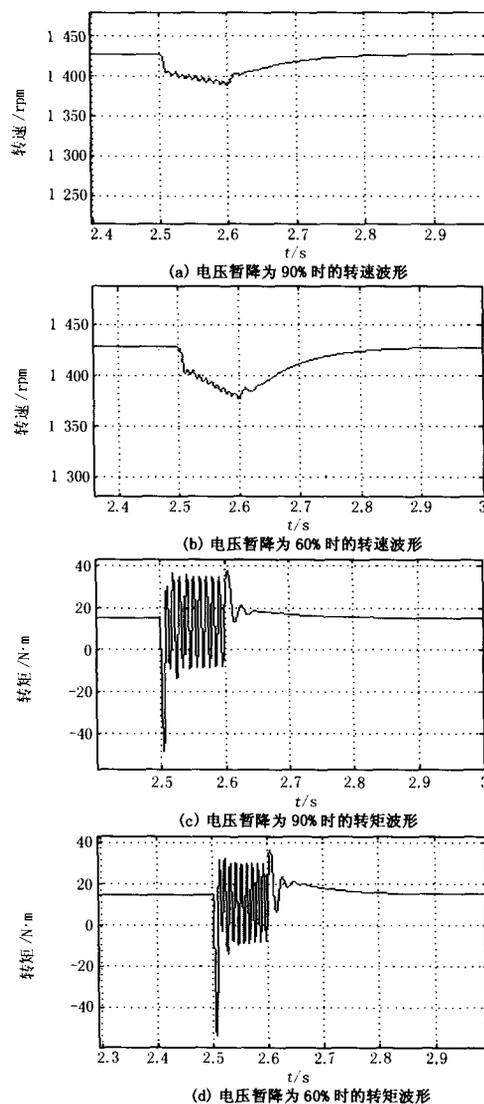


图 8 有相位跳变不同电压暂降时仿真波形

Fig.8 Simulation waveform under voltage sag with phase angle jump

对三相电压暂降的仿真分析结果表明, 与单相电压暂降相比, 其影响更为严重。会引起更严重的电机转速下降与转矩变化, 但转速与转矩中的波动成分减小。图 9 给出了 ABC 三相在 2.5~2.6 s 发生 60%、相位跳变 60° 时异步电机的转速与转矩波形。

在不同电能质量扰动情况下, 电机的运行效率也会受到不同程度的影响。通过分析计算可知, 对于文中的电机, 当三相不平衡度达到 2%时, 电机效率约从 90.66 下降到 89.99。在电压畸变、电压偏差时电机效率也有不同程度的下降。

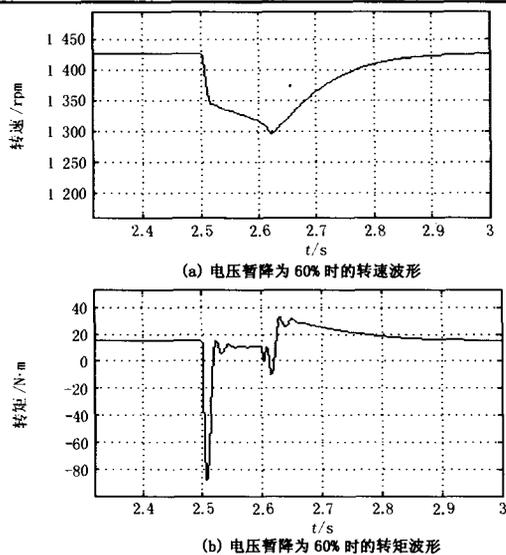


图 9 有相位跳变三相电压暂降时仿真波形

Fig.9 Simulation waveform under three-phase voltage sag with phase angle jump

3 结论

在三相电压不平衡、谐波与电压暂降情况下，异步电机的输出转矩中会出现不同程度的脉动转矩。在单相电压暂降情况下，电机输出转矩会发生振荡，并且其振荡幅度随暂降幅度的增大而增大。在单相和三相电压暂降情况下，在暂降发生时刻有一较大负转矩，其对电机冲击大，严重时会引起电机的短时制动，这对电机轴系有很大的损害。在电压偏低情况下，输出转矩中虽然不出现脉动成分，但电机的启动时间增加，如果长期处于低电压运行，会造成电动机绕组绝缘老化，甚至烧坏绕组，使电动机的使用寿命降低。

此外，在不同电能质量扰动情况下，电机的运行效率也会不同程度下降。因此，应充分了解电机运行的供电电压情况，针对具体情况采取相应的抑制措施，以使电机高效、正常运行，并达到节能降耗的目的。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning, HAN Min-xiao, XU Yong-hai, et al. Analysis and Control of Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 秦和. 电动机的能效水平及其影响[J]. 中小型电机, 2003, 30(1):1-13.
QIN He. Energy Efficiency Level of Motors and Its Influence[J]. S & M Electric Machines, 2003, 30(1):1-13.
- [3] 李森, 李善和. 电压偏差对异步电动机运行的影响[J]. 煤炭科技, 2004, (2):24-25.
LI Sen, LI Shan-he. Voltage Deviation Impact on Asynchronous Motor[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2004, (2):24-25.
- [4] 邓建国, 张立雄. 电源电压不对称时异步电动机瞬态过程的仿真, 电机技术, 2002, 16(3):14-18.
DENG Jian-guo, ZHANG Li-xiong. Simulation of Transient Under Unbalance Voltage for Asynchronous Motor, 2002, 16(3):14-18.
- [5] Lee Ching-Yin. Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(2):202-208.
- [6] Gomez J C, Morcos M M, Reineri C, et al. Induction Motor Behavior Under Short Interruptions and Voltage Sags[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001:11-15.
- [7] Souto O C N, de Oliveira J C, Ribeiro P F, et al. Power Quality Impact on Performance and Associated Costs of Three-Phase Induction Motors[A]. In: 8th ICHQP Proceedings[C]. 1998.791-797.

收稿日期: 2006-07-07; 修回日期: 2006-10-20

作者简介:

李国栋(1978-), 男, 工程师, 从事电能质量控制、分析与管理工作;

金焱(1980-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制;

顾强(1963-), 男, 高级工程师, 从事电能质量控制、分析与管理工作;

徐永海(1966-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统谐波、电能质量等方面的研究工作。E-mail: yonghaixu@263.net

许继集团荣获“河南省企业管理创新成果”一等奖

日前, 许继集团公司“以提升供应链价值为目标的集团化采购集成管理”项目荣获“河南省企业管理创新成果”一等奖。省企业联合会、省企业家协会及有关专家, 对该项目给予了一致认同和高度评价。

在快速发展中, 许继集团一直致力于经营管理思路的转变和完善。从满足客户需求和提高经营绩效出发, 对产品制造周期中的整个供应链系统进行通盘规划和控制, 将供应链管理纳入企业的总体经营战略中。尤其 2005 年以来, 以“采购利润”最大化为导向, 通过转变采购理念、组织机构调整、企业流程优化和对信息化工具的利用, 对集团的采购实行集成管理, 最大限度地提升供应链价值, 保证了企业战略目标的实现。