

电机系统能耗影响因素模型评价与分析*

骆超^{1,2,3,4}, 马伟斌^{1,2,3}, 赵军⁴

- (1. 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640;
2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东广州 510640;
4. 中低温热能高效利用教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 以电机系统为研究对象, 建立电机系统模型, 基于 MATLAB 软件, 理论模拟了电流特性、电源质量和负载率等对电机系统效率等指标的影响; 并基于层次分析法给出了不同影响因素的权重比例。结果表明: 电源质量对电机系统效率影响较大, 对于一般运行负载率为 0.6~1.0 的电机, 应尽量注意避免在过低的电源电压下运行; 对于短时工作制或包含启动、制动等过程工作制的电机系统就应选用高启动转矩的电机。该结果为电机系统的节能诊断与潜力分析提供了一种新思路, 具有指导意义。

关键词: 电机; 电流特性; 电源质量; 负载率; 层次分析法

中图分类号: TM 312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2016)08-0098-06

Evaluation Model Study of Energy Consumption Factor for Motor*

LUO Chao^{1,2,3,4}, MA Weibin^{1,2,3}, ZHAO Jun⁴

- (1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China;
4. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the model of motor system, the effect of current characteristics, power quality and load ration on motor energy consumption were studied. The results showed that the motor systems of different optimized parameters were of different weighting factor based on analytic hierarchy process method. Power quality had an crucial effect on the motor efficiency. Pump frequency conversion technologies were the main energy efficiency measurements for motor system. The results provided an evaluation method for the motor system construction.

Key words: motor; current characteristics; power quality; load ration; analytic hierarchy process

0 引言

目前, 电机消耗电量正在快速增长, 提高电机系统(包括电动机和调速驱动系统)的效率是节能工程关注的重点。通过系统优化, 其节能潜力可达 30%~60%; 我国经济快速发展, 由此消耗的电能比例比发达国家和地区更高^[1]。国内外对电机系统能耗影响和技术手段都做了较多的研究。在故障诊断和效率监测方面, 沈阳航空航天

大学和上海海事大学^[2-3], 开发了电机系统故障诊断和效率监测软件, 实现电机在线实时监测, 确定电机系统主要故障, 并深入分析了故障原因, 找出解决方案; 钟衍等^[4]详细分析了建筑电气节能诊断方法的步骤和内容, 并提出建立电气专家诊断系统; 在节能技术实施方面, 舒服华等^[5]介绍了包括电机选型、提高功率因数和结构改造方面的实用技术, 电机系统的节能潜力巨大, 为提高电机效率, 达到节能目的, 基于全生命周期法, 提出了

* 基金项目: 广东省科技计划项目(2013B091500087); 典型用能系统节能诊断技术研究与应用

作者简介: 骆超(1982—), 男, 在职博士研究生, 助理研究员, 研究方向为电机系统节能诊断技术及节能效益评估。

一套完整的电机选择与节能分析模型^[6];在电机节能控制技术方面,开发了软起动控制系统,提出了最小电流点跟踪技术的节能技术^[7];在电机系统节能服务方面,从合同能源管理的角度,提出了电机系统节能方案^[8-9]。

影响电机系统的因素较多,并有相应的技术措施提高电机系统效率,但是还缺乏基于相关理论的评估模型和权重分析,因此,有必要对电机系统的影响因素进行权重分析。

1 电机系统模型建立

电机系统物理模型主要包括电机和水泵,物理模型如图 1 所示。电机和水泵通过传动轴连接,电机通过电源输入三相交流电提供动力。

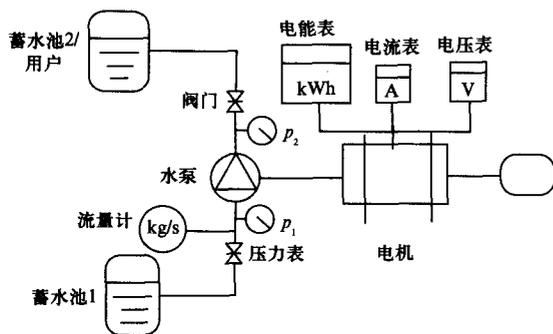


图 1 电机系统物理模型

电机经济运行的性能参数指标主要包括负载系数、运行效率和功率因数。

(1) 负载系数为电动机输出功率与其额定功率之比(GB/T 12497—2006):

$$K = \frac{-1 + \sqrt{1 + \frac{4 \left[\left(\frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_e \right] (P_{EM-in} - P_e)}{P_N^2}}}{2 \left[\left(\frac{1}{\eta_N} - 1 \right) P_N - P_e \right]} \quad (1)$$

如果无法确定 P_e , 则按照式(2)计算:

$$K = \left\{ 1.013 \frac{P_{EM-in}}{P_N} + \frac{1}{\beta + 1} \left(\frac{1}{\eta_N} - 1 \right) \left[0.85 \left(\frac{P_{EM-in}}{P_N} \right)^2 + \beta \right] \right\} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_N ——额定功率;

P_e ——空载功率;

η_N ——额定效率;

P_{EM-in} ——电机输入功率,测量获得;

β ——电机的损耗因数,根据电机系列、额定功率、极数查表 1 即可获取。

表 1 电机的损耗因数 β 表

P_N/kW	2 极	4 极	6 极	8 极	类型
2 ~ 7.5	0.5	0.4	0.3	0.3	JO2 系列
10 ~ 22	0.8	0.45	0.45	0.4	Y 系列
30 ~ 55	1.0	0.5	0.5	0.5	
75 ~ 100	1.2	0.8	0.7	0.7	
60 ~ 300		0.4	0.35	0.32	JR、JS 系列

(2) 运行效率为电机输出功率与其输入功率之比(GB/T 12497—2006):

$$P_{EM-out} = K P_N \quad (3)$$

$$\eta_{EM} = \frac{P_{EM-out}}{P_{EM-in}} \% \quad (4)$$

当 $\eta_N = \eta_{EM}$ 时,负载系数 K 达到最小值 K_{min} ,经济运行时, K 值要大于 K_{min} 。

$\eta_{EM} > \eta_N$ 时,才符合经济运行标准。

(3) 功率因数(GB/T 12497—2006):

$$\cos \varphi = \frac{P_{EM-in}}{\sqrt{3} U_{EM-in} I_{EM-in} \times 10^{-3}} \quad (5)$$

式中: P_{EM-in} ——电机输入功率,kW,测量获得;

U_{EM-in} ——输入电压,取定值 380 V, $\times 10^{-3}$ 表示单位换算成 kV;

I_{EM-in} ——输入电流,通过测量获得,A。

2 电机系统能耗影响因素分析

评价电机系统能耗的主要指标包括电机及其拖动系统的效率。电机系统效率是电机输出功率与输入功率的比值,影响电机效率的因素有电流变化、功率因数变化、电源质量、负载特性和负载率等。

(1) 电流对电机效率的影响。电机的电流-效率特性曲线反映了电机效率随电流变化的特征。不同型号的电机额定状态下效率 η 值不同, η 的最大值也不同。用 $\eta/\eta_{额定}$ 作为电机特性曲线的一个变量,得到如图 2 所示的曲线。

空载时输出功率为 0,当负载从 0 增加时,电机的总损耗增加较慢,效率曲线上升很快,直到随负载变化的可变损耗等于不变损耗时,效率达到

最大值,如图 2 所示。由图 2 可知: 电流标幺值 I^* 为 0.8 ~ 0.9 时,效率 η 达到最大值为 1; $I^* > 0.6$ 时, η 较高; $I^* < 0.6$ 时, η 开始迅速下降,直到空载状态为 0。

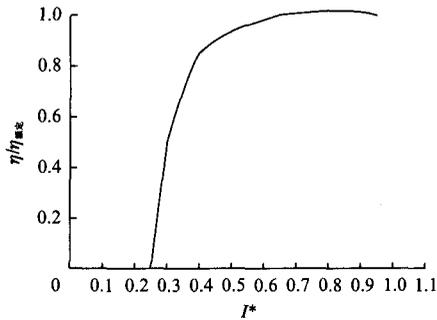


图 2 电机电流-效率特性曲线

(2) 电源质量对电机效率的影响。根据 GB755《旋转电机定额和性能》的规定, 电源电压最大可允许 $\pm 10\%$ 的偏差。由于铁耗约与电压的平方成正比, 定子和转子绕组电流损耗约与电压平方成反比, 因此电机效率与电压变化的关系, 将与不同负载率时, 以铁耗为主的不变损耗和定、转子绕组电流损耗为主的可变损耗的比例有关。取一台额定功率为 40 kW、4 极的电机, 相关参数如下: $P_N = 40 \text{ kW}$, $I_N = 77.4 \text{ A}$, $\eta_N = 90\%$, $\cos\varphi_N = 0.87$, 实测 $P_{EM} = 29.4 \text{ kW}$, $I_{EM} = 55.8 \text{ A}$ 。

从图 3 可见, 当电机端电压为 0.85 额定电压时, 额定负载时的效率下降较多, 在 3/4 负载时效率也有一定的下降, 但在 1/2 负载以下时, 其效率则高于额定电压时的效率。因此, 对于一般运行负载率为 0.6 ~ 1.0 的电机, 应尽量注意避免在过低的电源电压下运行。

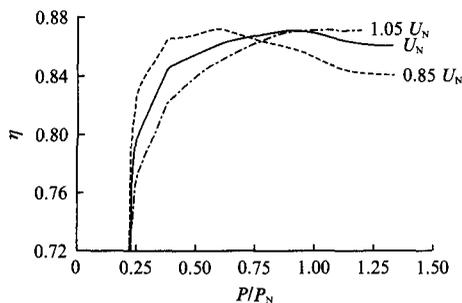


图 3 电源电压变化对电机效率的影响

(3) 负载特性对电机效率的影响。选用电机时, 应注意负载特性对电机能耗的影响。对于一般

恒定负载连续运行的场合, 如图 4 所示。从图 4 可知: 电气损耗 P_V 不随时间而变, 因此可选用在恒定负载时损耗低、效率高的电机。对于负载特性为周期性工作制, 如图 5 所示。从图 5 可知: 短时工作制或包含起动、制动等过程的工作制, 其损耗 P_V 由起动加速的损耗和恒定负载的损耗组成, 选用电机时, 就应选用高起动转矩的电机。

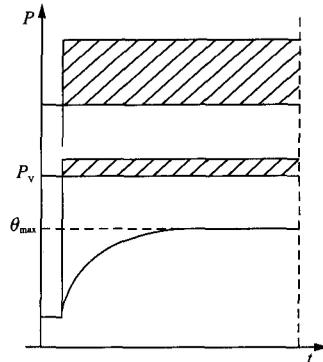


图 4 连续工作

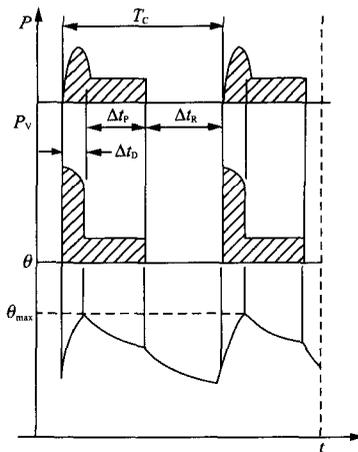


图 5 断续周期工作

(4) 负载率对电机效率的影响。图 6 所示为一台电机的两种设计所对应的效率与负载率的关系曲线。曲线 A 为空载损耗 $P_0 = 0.03P_N$, 电机可变损耗 $P_{LN} = 0.08P_N$; 曲线 B 为空载损耗 $P_0 = 0.06P_N$, 电机可变损耗 $P_{LN} = 0.05P_N$ 。由图 6 可见, 两种设计的效率曲线相差较大, 高空载损耗的效率最高点发生在负载率为 1.095 接近额定功率处; 低空载损耗的效率最高点发生在负载率为 0.612 处, 并且负载率在 0.5 ~ 1.0 的范围内, 效率较高。由于电机大多运行在负载率为 0.6 ~ 1.0 的范围内, 因此, 高效率电机均采用低空载损

耗设计,具有曲线 A 的效率曲线。另外,从图 6 可见,不论何种设计,当负载率低于 0.5 以后,电机效率急剧下降,因此选用电机效率的负载率不能过低。

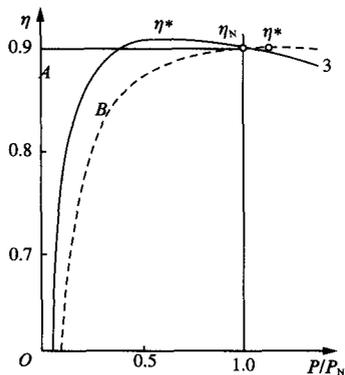


图 6 电机效率和负载率的关系

3 评价方法及模型分析

3.1 层次分析法

影响电机系统效率的因素较多,采用传统的评价指标和方法,由于指标分散,结果影响各有不同,很难从总体上得出全面、客观、综合的结论,要作进一步评价必须构建综合评价模型,分析各影响因素的权重。层次分析法分为以下四个步骤:

(1) 建立层次结构模型。明确所要解决的问题,搞清楚问题所涉及的因素以及各因素之间的相互关系。

(2) 构造判断矩阵。设有 m 个目标(方案或元素),根据某一准则,将这 m 个目标两两进行比较。层次分析法在对指标的相对重要性进行评判时,引入了九分位的比例标度,如表 2 所示。

表 2 相对重要性的比例标度

甲指标比乙指标	极重要	很重要	重要	略重要	同等	略次要	次要	很次要	极次要
甲指标评价值	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9

注:取 8、6、4、2、1/2、1/4、1/6、1/8 为上述评价值的中间值。

(3) 判断矩阵的一致性检验。对于每一层次作单准则排序时,均需要作一致性的检验。对判断矩阵的一致性进行检验,首先计算一致性指标 $C. I.$, 计算公式:

$$C. I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

式中: λ_{\max} ——矩阵最大特征向量值;
 n ——矩阵阶数。

计算一致性比率 $C. R.$, 计算公式:

$$C. R. = \frac{C. I.}{R. I.} \quad (7)$$

查找相应的随机一致性指标 ($R. I.$), 给出判断结果,如表 3 所示。当 $C. R. < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修改。

表 3 平均随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$R. I.$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

(4) 层次排序,给出决策排名。

3.2 影响因素评价模型及分析

建立评价模型的目标是分析影响电机系统能耗的关键因素,并对其排序。通过上述分析,电机

系统供选择的影响因素主要有:电流特性、电源质量、负载特性、负载率、泵/风机阻力;考虑的主要因素包括:铁损耗、铜损耗、机械损耗。电机能耗影响因素构建评价模型如图 7 所示。

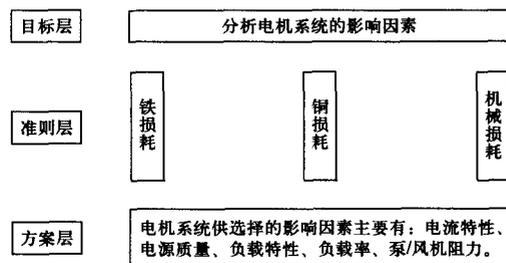


图 7 电机系统能耗因素评价模型

根据上述影响因素分析结果,以及层次分析法中相对重要性比例标度原则,构造准则层对目标的成对比较矩阵 A 。对目标矩阵 A 的各列进行归一化处理,得到矩阵 A 的特征值 λ_A 和权重系数分别 ω_A 为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 \end{bmatrix}, \lambda_A = \begin{bmatrix} 0.8485 \\ 1.9302 \\ 0.2213 \end{bmatrix}$$

$$\omega_A = \begin{bmatrix} 0.2828 \\ 0.6434 \\ 0.0738 \end{bmatrix}$$

目标矩阵 A 的最大特征向量 λ_{\max} 和一致性指标 $C.I$ 分别为

$$\lambda_{\max} = 3.07, C.I = 0.033$$

一致性比率 $C.R = C.I/R.I = 0.063 < 0.1$, 矩阵 A 通过一致性验证。

构造方案层: 电流特性、电源质量、负载特性、负载率、泵/风机阻力; 对准则层: 铁损耗、铜损耗、机械损耗的目标矩阵 $B_1^{(5)}$ 、 $B_2^{(5)}$ 、 $B_3^{(5)}$ 为

$$B_1^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 5 & 3 & 7 \\ 2 & 1 & 7 & 5 & 9 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{5} & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 5 & 1 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_2^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 7 & 5 & 7 \\ 3 & 1 & 9 & 3 & 9 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{3} & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_3^{(5)} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 2 & 1 & 3 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{7} \\ 3 & 2 & 2 & 1 & \frac{1}{9} \\ 5 & 4 & 7 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

对第二层次目标矩阵 $B_1^{(5)}$ 、 $B_2^{(5)}$ 、 $B_3^{(5)}$, 归一化处理, 得到特征向量和权重分别记为 λ_{B_1} 、 λ_{B_2} 、 λ_{B_3} 和 ω_{B_1} 、 ω_{B_2} 、 ω_{B_3} :

$$\lambda_{B_1} = \begin{bmatrix} 1.3998 \\ 2.3296 \\ 0.3233 \\ 0.7721 \\ 0.1752 \end{bmatrix}, \lambda_{B_2} = \begin{bmatrix} 0.4332 \\ 0.6971 \\ 0.2550 \\ 0.8100 \\ 2.8047 \end{bmatrix}, \lambda_{B_3} = \begin{bmatrix} 0.4332 \\ 0.6971 \\ 0.2550 \\ 0.8100 \\ 2.8047 \end{bmatrix}$$

$$\omega_{B_1} = \begin{bmatrix} 0.2800 \\ 0.4659 \\ 0.0647 \\ 0.1544 \\ 0.0350 \end{bmatrix}, \omega_{B_2} = \begin{bmatrix} 0.0866 \\ 0.1394 \\ 0.0510 \\ 0.1620 \\ 0.5609 \end{bmatrix}, \omega_{B_3} = \begin{bmatrix} 0.0866 \\ 0.1394 \\ 0.0510 \\ 0.1620 \\ 0.5609 \end{bmatrix}$$

第二层次目标矩阵 $B_1^{(5)}$ 、 $B_2^{(5)}$ 、 $B_3^{(5)}$ 的一致性指标 $C.I_{B_1}$ 、 $C.I_{B_2}$ 、 $C.I_{B_3}$ 和一致性比率 $C.R_{B_1}$ 、 $C.R_{B_2}$ 、 $C.R_{B_3}$ 分别为 $C.I_{B_1} = 0.008$, $C.R_{B_1} = 0.07$; $C.I_{B_2} = 0.097$, $C.R_{B_2} = 0.087$; $C.I_{B_3} = 0.079$, $C.R_{B_3} = 0.071$; 第二层次目标矩阵 $B_1^{(5)}$ 、 $B_2^{(5)}$ 、 $B_3^{(5)}$ 均通过一致性验证。

第二层次目标矩阵 $B_1^{(5)}$ 、 $B_2^{(5)}$ 、 $B_3^{(5)}$ 的权重组成新的矩阵 ω_B , 层次总目标排序为 ω_B 和 ω_A 的乘积:

$$\omega_B = \begin{bmatrix} 0.2800 & 0.309628 & 0.086647 \\ 0.4659 & 0.463102 & 0.139413 \\ 0.0647 & 0.058963 & 0.051007 \\ 0.1544 & 0.134699 & 0.16199 \\ 0.0350 & 0.033609 & 0.560943 \end{bmatrix}$$

$$\omega = \omega_B \omega_A = \begin{bmatrix} 0.2800 & 0.309628 & 0.086647 \\ 0.4659 & 0.463102 & 0.139413 \\ 0.0647 & 0.058963 & 0.051007 \\ 0.1544 & 0.134699 & 0.16199 \\ 0.0350 & 0.033609 & 0.560943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.2828 \\ 0.6434 \\ 0.0738 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2848 \\ 0.4400 \\ 0.0600 \\ 0.1423 \\ 0.0729 \end{bmatrix}$$

通过层次分析评价模型和计算, 影响电机及其拖动系统能耗的 5 个主要影响因素: 电流特性、电源质量、负载特性、负载率、泵/风机阻力, 所占的权重分别为 28.48%、44.00%、6.00%、14.23%、

7.29%。即对电机能耗影响因素从大到小依次为电源质量、电流特性、负载率、泵/风机阻力、负载特性。上述影响因素为电机能耗节能诊断奠定了基础, 在电机能耗诊断过程中, 可以依次按照上述

排序对电机能耗进行诊断,根据诊断测试数据进行性能指标计算和对标。

4 结 语

本文分析了影响电机系统效率的关键因素,并基于层次分析法,给出了各关键因素的权重比例,为电机能耗诊断提供了一种新思路。

电源质量对电机系统效率影响较大,对于一般运行负载率为0.6~1.0的电机,应尽量注意避免在过低的电源电压下运行;对于短时工作制或包含起动、制动等过程的工作制的电机系统就应选用高起动转矩的电机。

影响电机系统效率的关键因素及其权重依次为电源质量(44.00%)、电流特性(28.48%)、负载率(14.23%)、泵/风机阻力(7.29%)、负载特性(6.00%),为电机系统的节能诊断提供量化依据。

【参 考 文 献】

- [1] 陈伟华,李秀英,姚鹏. 电机及其系统节能技术发展综述[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(4): 1-5.

- [2] 刘翀. 电机系统故障诊断和效率监测的设计开发与实现[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2011.
- [3] 朱建山. 异步电机故障诊断方法研究与应用[D]. 上海: 上海海事大学, 2007.
- [4] 钟衍,方林. 建筑电气节能诊断方法初探[J]. 智能建筑, 2008(1): 45-49.
- [5] 舒服华,王艳. 电机节能降耗技术和方法探讨[J]. 电机技术, 2008(3): 39-42.
- [6] 郭维,胡静涛. 电机选择与节能分析模型研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(4): 250-252.
- [7] 徐润启. 电机节能控制技术与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [8] 陈文刚. 电机系统节能服务实施方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [9] 李光耀,陈伟华. 高效节能电机的研究与产品开发[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(2): 1-5.

收稿日期: 2016-03-25

【参 考 文 献】

- [1] 陈伟华,李秀英,姚鹏. 电机及其系统节能技术发展综述[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(4): 1-5.

(上接第92页)

【参 考 文 献】

- [1] TURNER J A. A realizable renewable energy future [J]. Science, 1999, 285(30): 687-689.
- [2] 王栋. 双馈感应发电机绕组匝间短路故障分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- [3] 钱雅云,马宏忠. 双馈异步电机故障诊断方法综述[J]. 大电机技术, 2011(5): 5-8.
- [4] STEFANI A, YAZIDI A, ROSSI C, et al. Double fed induction machines diagnosis based on signature analysis of rotor modulating signals [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 44(6): 1711-1721.
- [5] 马宏忠,时维俊,韩敬东,等. 计及转子变换器控制策略的双馈风力发电机转子绕组故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 119-125.
- [6] 李俊卿,王栋. 双馈感应发电机转子匝间短路时定子电流谐波分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 71-75.
- [7] 张正东,马宏忠,陈涛涛. 双馈异步发电机转子绕组不对称故障的诊断研究[J]. 微电机, 2014, 47(9): 42-45.
- [8] ABADI M B, CRUZ S M A, CONCALVES A P, et al. Detection of stator and rotor faults in a DFIG based on the stator reactive power analysis [C] //

Proceedings of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, held in Dallas, USA, 2014: 362-371.

- [9] 刘振兴,尹项根,张哲,等. 基于瞬时功率信号频谱分析的鼠笼式异步电动机转子故障在线诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 148-152.
- [10] 刘振兴. 电机故障在线监测诊断新原理和新技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [11] 高景德,王祥珩,李发海,等. 交流电机及其系统分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [12] LI J Q, WANG D, HE L. Study of rotor winding inter-turn short circuit fault in doubly fed induction generator based on current signal spectrum analysis [C] // Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, held in Busan, South Korea, 2013: 789-792.
- [13] 刘振兴,张哲,尹项根,等. 一种新型的笼型异步电动机转子故障在线监测和诊断方法[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 89-92.
- [14] 马宏忠. 电机状态检测与故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [15] 马宏忠,张志艳,张志新,等. 双馈异步发电机定子匝间短路故障诊断的研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 50-53.

收稿日期: 2016-01-26