

控制工程

Kong Zhi Gong Cheng

第25卷 第3期

2018年03月20日

目次

工业过程及控制系统

- 改进K-means算法优化RBF神经网络的出水氨氮预测.....乔俊飞, 孙玉庆, 韩红桂 (375)
- 板带轧制凸度与厚度鲁棒解耦控制器设计.....高玉峰, 童朝南, 高兴华 (380)
- 反向响应过程PID控制回路性能评估.....郑克波, 梁小丽, 刘飞 (386)
- 基于T-S模糊神经网络的PM_{2.5}预测研究.....乔俊飞, 蔡杰, 韩红桂 (391)
- 基于Kriging近似模型的非线性预测函数控制.....符莎, 施惠元, 赵民新, 欧阳海鹏, 王尚明 (396)

安全监控系统

- 基于贝叶斯ICA的多工况非高斯过程故障检测.....邓晓刚, 徐莹 (402)
- 基于正弦阈值滤波的步进电机转子位置检测.....郑雪钦, 高镛源 (408)
- 基于水平集演化与遗传优化的缺陷检测算法.....王志坚 (413)
- 多线并发电力系统的非对称故障分析方案.....王珏, 杨文刚 (417)
- 基于SVD和SVDD的轴承故障诊断.....刘英杰, 范玉刚, 吴建德 (423)

运动体控制系统

- 变截式L定子纵振模态驱动的直线超声电机.....贺红林, 余九, 廖永林, 何文丛, 凌普 (428)
- 基于改进型ABC算法的异步电机参数估计方法.....李宏娟, 徐格宁, 姚艳萍 (436)
- 具有时变延时及执行器饱和的自主车队控制.....吴利刚, 周倩 (442)
- 自平衡机器人内在电机小脑操作学习控制.....陈静, 李冰, 李莉, 李宗帅 (448)
- 基于极端学习机的并联机器人运动学研究.....陈平, 张宏立 (454)

建模与仿真

- 基于加权极端学习机的瓦斯涌出量预测模型.....谢国民, 谢鸿, 付华, 闫孝垣 (459)
- 基于示功图的抽油井动液面软测量机理建模.....李翔宇, 高宪文, 侯延彬 (464)
- 分布式参数系统的随机梯度辨识.....陈晶, 刘艳君 (472)

人工智能驱动的自动化

- 基于QPSO-ELM的过程神经网络及时间序列预测.....刘志刚, 许少华, 李盼池, 冯永强 (477)
- 基于改进差分进化算法的滑模控制参数整定.....黄健, 周端 (484)
- 基于虚拟样本的加权稀疏表示人脸识别研究.....项晓丽, 武圣, 龙伟, 武和雷 (488)
- 基于量子粒子群优化设计的分数阶PID控制器.....张欣, 仲崇权 (493)

工业互联网

- 一种高精度无线网络衰落信道直接预测算法.....张建军, 杜莉, 宋玉娥 (499)
- 基于折半运算的带符号阶乘展开式标量乘法.....鹿根明 (504)
- 混合网络的资源分配与虚拟机部署优化算法.....邹裕, 覃中平 (509)
- 随机网络空模型负特征谱平分DAG相似分区.....贾羽, 金磊, 张梅 (516)
- 智能小车任务执行系统的Petri网设计方法.....罗怀菊, 赵琦, 罗继亮 (522)
- 一种整数上的PACDP全同态加密改进.....石云, 陈钟, 管彦允 (527)

工业过程管理与决策系统

- 基于模型预测控制的动态多属性决策方法.....张敏敏, 李宏光, 宿耕 (535)

期刊基本参数: CN21-1476/TP*1994*m*A4*166*zh*P*¥25.00*29*2018-03

多线并发电力系统的非对称故障分析方案

王珏¹, 杨文刚²

(1. 山西电力职业技术学院 电力工程系, 太原 030021; 2. 山西交通职业技术学院 工程机械系, 太原 030031)



摘要: 已有的电力系统故障分析方案无法适用于所有的故障场景, 对此提出一种电力系统多线并发的非对称故障分析方案。首先, 通过电流图计算故障前条件, 更新电力系统并创建新节点来仿真不同类型的故障; 然后, 引入RLC组件代表不同的故障类型, 并计算右手定则向量与雅可比矩阵; 最终, 通过计算系统指标的增量进行电力系统的状态分析。基于IEEE的测试平台对该方案进行验证实验, 结果证实, 该方案可分析电力系统不同类型的故障以及并发的故障。

关键词: 电力系统; 故障分析; 并发故障; 右手定则; 雅可比矩阵; 智能电网

中图分类号: TM938

文献标识码: A

An Unbalanced Simultaneous Fault Analysis Schema of Multi-conductor Electrical Systems

WANG Jue¹, YANG Wen-gang²

(1. Department of Electric Power Engineering, Electric Power Occupational Technical Institute of SEPC, Taiyuan 030021, China; 2. Department of Engineering Machine, Shanxi Traffic Vocational and Technical College, Taiyuan 030031, China)

Abstract: The existing fault analysis schemas of electrical systems are not suitable for all kinds of faults, an unbalanced simultaneous fault analysis schema of multi-conductor electrical systems is proposed to resolve that problem. Firstly, the pre-fault conditions are calculated through a power flow program, the electrical system is updated and new nodes are created to simulate different types of faults; then, RLC elements are inserted to represent the various types of faults, the right-hand vector and Jacobian matrix are computed; lastly, the electrical system is analyzed through computing the increment value of system measurements. IEEE test platform is used for validation experiment of the proposed schema, the results show that the proposed schema is suitable for different types of fault analysis and simultaneous fault analysis.

Key words: Electric system; fault analysis; simultaneous fault; right-hand rule; Jacobian matrix; smart grid

1 引言

电力系统分析的一个主要目标是开发可描述不同网络拓扑、不同设备的分析工具, 从而改善工程师的操作条件与部署效率^[1,2]。现有的故障分析方案为了简化分析, 假设电网为对称、平衡的结构^[3], 这些基于对称组件的电网故障分析方案可极大地简化分析, 但会为非对称、非平衡的电力系统中线性电网引入耦合的效应^[4,5]。

已有部分文献对非平衡电力系统提出了有效的故障分析方案: 文献^[6]为非平衡电力系统提出了一种混合补偿的故障分析方案, 该方案设计了2个包含电网拓扑特征信息的矩阵, 其实验结果显示该方案易于实现、计算速度快以及分析的精度较高。文献^[7]考虑分布式发电系统与智能电网会使辐射型

配电网变为弱环网, 为此设计了非对称、高精度的弱环配电网故障分析方案。文献^[8-10]则针对分布式系统设计了专门的故障诊断或分析的方案。上述文献均针对非平衡电网或分布式电网的部分指标进行了提高, 或者仅可分析某种故障情况, 不具备普遍适用性, 并且不能表示中性电缆等电缆组件。

针对上述问题, 本文设计了可应用于各种多相电力系统的故障分析方法, 可对断相故障、短路故障与复杂故障等不同的故障类型进行有效的分析。与其他的故障分析方法相比, 本方案主要有优势:

① 可在相坐标中建模不同类型的电力系统, 包括同一电路相位间的互阻抗, 相同或不同电压级别电路间的互阻抗。

收稿日期: 2016-12-13; 修回日期: 2017-04-07

作者简介: 王珏(1984-), 女, 山西临汾人, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统、自动控制等方面的教学与科研工作; 杨文刚(1980-), 男, 山西忻州人, 硕士, 讲师, 主要从事电气自动化、自动控制等方面的教学与科研工作。

- ② 可直接表示不同类型的变压器接线。
- ③ 表示多相系统的故障(单相、二相、三相等)。
- ④ 可表示不同类型的电力系统,包括辐射状电网、环形电网与分散式发电电网等。
- ⑤ 可表示接地、地线、中性线。
- ⑥ 可简单、直观地表示并发的故障。
- ⑦ 可仿真系统不同点之间的故障。
- ⑧ 可仿真设备的内部故障。

2 多线并发故障的分析方法

2.1 方法步骤

本方法将电网与设备建模为相坐标与电量的形式,电力系统的方程定义为直角坐标形式的电流注入。图本方法的流程框图,如图1所示。

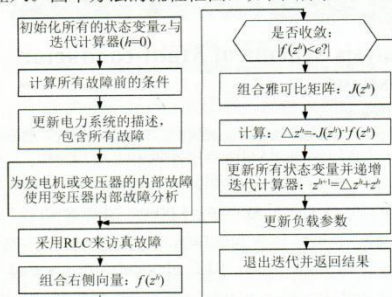


图1 电力系统故障分析方法的流程图
Fig. 1 The diagram of the electrical system fault analytic method

图1中, z 为状态变量, f 为所有系统节点的电流注入方程。状态变量为单相接地电压,在直角坐标中表示为实部与虚部。

- ① 加载电力系统的所有设备数据,以及仿真中预设的故障位置与类型。
- ② 通过电流图计算故障前条件。
- ③ 更新电力系统并创建新节点来仿真②的故障,例如,如果一条输电线的中间出现故障,则会创建多个节点并将输电线分割。
- ④ 如果一个变压器内部发生故障,使用2.2.3小节的程序表示故障的设备。
- ⑤ 引入RLC组件代表不同的故障类型,如2.2.5小节所示。
- ⑥ 组成右手定则向量 f 。
- ⑦ 进行收敛性测试($e=10^{-6}$)。
- ⑧ 组合雅可比矩阵 J 。
- ⑨ 根据式(1)计算增量。计算对右手定则向量 f 的贡献度,与状态变量(V_{Re}, V_{Im})相关的 f -一阶导数作为雅可比矩阵 J 的贡献度。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{Im_1} \\ \Delta V_{Re_1} \\ \Delta V_{Im_2} \\ \Delta V_{Re_2} \\ \vdots \\ \Delta V_{Im_{nb}} \\ \Delta V_{Re_{nb}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & \dots & J_{1,nb} \\ J_{2,1} & J_{2,2} & \dots & J_{2,nb} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{nb,1} & J_{nb,2} & \dots & J_{nb,nb} \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta I_{Re_1} \\ \Delta I_{Im_1} \\ \Delta I_{Re_2} \\ \Delta I_{Im_2} \\ \vdots \\ \Delta I_{Re_{nb}} \\ \Delta I_{Im_{nb}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ΔV_{Re} 与 ΔV_{Im} 分别为相位接地电压增量的实部与虚部, ΔI_{Re} 与 ΔI_{Im} 为注入的净电流; $J_{k,m}$ 为偏一阶导数,定义如下:

$$J_{k,m} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta I_{Re_k}}{\partial \Delta V_{Im_m}} & \frac{\partial \Delta I_{Re_k}}{\partial \Delta V_{Re_k}} \\ \frac{\partial \Delta I_{Im_k}}{\partial \Delta V_{Im_m}} & \frac{\partial \Delta I_{Im_k}}{\partial \Delta V_{Re_k}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

- ⑩ 更新状态变量。
- ⑪ 更新负载参数。如果 $|V_{LD}| \leq v_{Lim}$, α 与 β 设为2;如果 $|V_{LD}| > v_{Lim}$, α 与 β 设为原值。 V_{LD} 为负荷终端的电压, v_{Lim} 是负载最小电压。
- ⑫ 退出迭代过程并返回分析结果。

2.2 电力组件模型

该小节详细描述本非对称故障分析方案对电力网络各个组件的表示方法。

2.2.1 传输线与分布线模型

将传输线与分布线建模为一个耦合的 n 相位、 π -型的集总参数电路,使用式(3)(4)建模节点集 k 与 m 之间的分布线^[11]。

$$I_{km,jin} = \begin{bmatrix} Z_{k1,m1} & Z_{k1,m2} & \dots & Z_{k1,mm} \\ Z_{k2,m1} & Z_{k2,m2} & & Z_{k2,mm} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{kn,m1} & Z_{kn,m2} & \dots & Z_{kn,mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{k1} - V_{m1} \\ V_{k2} - V_{m2} \\ \vdots \\ V_{kn} - V_{mn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{k11} & Z_{k12} & \dots & Z_{k1n} \\ Z_{k21} & Z_{k22} & & Z_{k2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{kn1} & Z_{kn2} & \dots & Z_{knn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ \vdots \\ V_{kn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$I_{mk,jin} = \begin{bmatrix} Z_{k1,m1} & Z_{k1,m2} & \dots & Z_{k1,mm} \\ Z_{k2,m1} & Z_{k2,m2} & & Z_{k2,mm} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{kn,m1} & Z_{kn,m2} & \dots & Z_{kn,mm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{m1} - V_{k1} \\ V_{m2} - V_{k2} \\ \vdots \\ V_{mn} - V_{kn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{m11} & Z_{m12} & \dots & Z_{m1n} \\ Z_{m21} & Z_{m22} & & Z_{m2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Z_{mn1} & Z_{mn2} & \dots & Z_{mnn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ \vdots \\ V_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

⑥ 计算广义的变压器节点导纳矩阵(Y_{trf}):

$$Y_{trf} = A'_{inc} W_{vv} Z^{-1}_{primitive} W_{vv} A_{inc} \quad (9)$$

2.2.4 发电机与变电站模型

将发电机与变电站建模为阻抗之后的电压源,如图4所示。

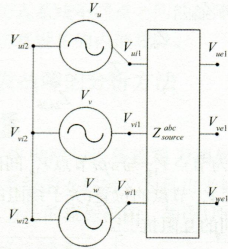


图4 发电机模型
Fig. 4 The model of the electric generator

为故障前的条件计算电压源的参数, 这些参数在故障计算过程中保持固定。

式(10)为节点 V_{se1} 与 V_{si1} 之间的电流方程, 式(11)定义电压源的当前贡献度, 式(12)为电压关系方程。

$$I_{e1}(z) = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ae1} - V_{ai1} \\ V_{be1} - V_{bi1} \\ V_{ce1} - V_{ci1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$I_{s,j1}(z) = \frac{|V_{s,j1} - V_{s,j2}|^2 P_{s,ger} - |V_{s,j1} - V_{s,j2}|^2 Q_{s,ger}}{(V_{s,j1} - V_{s,j2})^*} \quad (11)$$

$$I_{s,j2}(z) = -I_{s,j1}(z) \quad (12)$$

$$V_{s,j1} - V_{s,j2} = \Delta V_s$$

式中, $s = \{a, b, c\}$; $P_{s,ger}$ 与 $Q_{s,ger}$ 分别为电压源的有功功率与无功功率, 均是状态变量; ΔV_s 为故障前电压源的内部电压。

2.2.5 RLC组件模型

本文采用 RLC 组件来表示故障^[13]。式(13)定义了2个节点之间连接的 RLC 方程, 式(14)定义了节点 k 与地极之间连接的 RLC 方程:

$$I_k(z) = y_{km}(V_k - V_m), \quad I_m(z) = y_{km}(V_m - V_k) \quad (13)$$

$$I_k(z) = y_k(V_k) \quad (14)$$

式中, $V_k = V_{Re,k} + jV_{Im,k}$ 与 $V_m = V_{Re,m} + jV_{Im,m}$ 为节点 k 与 m 的电压向量。

几个 RLC 组件连接的可能情况, 可表示多个故障类型, 如并发故障、相位中性点故障以及复杂

故障等, 如图5所示。

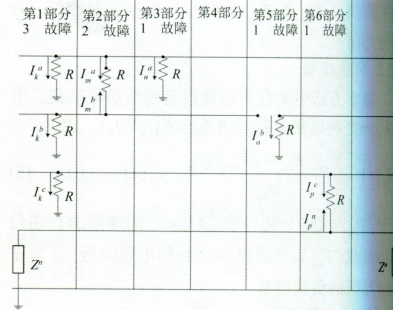


图5 部分故障的描述形式
Fig. 5 The description of some faulty categories

RLC 表示复杂故障的方法, 其形式简明。而其他的许多故障分析方案中无法表示此类故障。本文方案可仿真中性线, 所以对于非直接接地的系统, 可获得更为精确的结果, 如图6所示。

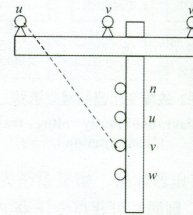


图6 分布系统的中低压故障模型
Fig. 6 The middle and low voltage fault model of the distributed system

2.2.6 接地电容与寄生电容模型

接地电容使用 RLC 组件建模, 与其他设备结合使用, 例如发电机接地变压器或 zig-zag 变压器。设备的寄生电容, 例如 CTs, VTs, 变压器、浪涌电压抑制器等设备建模为 RLC。

3 算例分析

基于 IEEE4 测试系统^[14,15]测试本方案的有效性, IEEE4 的单线图, 如图7所示。

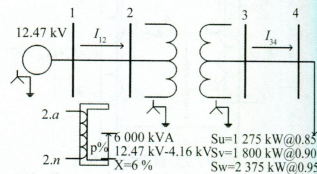


图7 IEEE4 测试系统
Fig. 7 IEEE4 test system

总线电压 V_{UN} 、 V_{VN} 、 V_{WN} 的故障前电压值分别设为定值 $7200\angle 0.0^\circ\text{V}$ 、 $7200\angle -120.0^\circ\text{V}$ 、 $7200\angle 120.0^\circ\text{V}$ 。

同时,图中也给出了三相汇流条2与3之间变压器绕组的详细结构。 $p\%$ 值是中性点的变压器绕组百分比,仿真中假设绕组为理想绕组。

3.1 50%绕组的故障场景

为了仿真变压器的内部故障,在50%的高电压绕组(三相汇流条2与3之间)的50%位置建立一个 wpi 节点,如图7所示。将故障表示为一个可忽略的电阻($10^{-8}\Omega$),忽略汇流条4的负载。

详细的仿真结果,如图8所示。

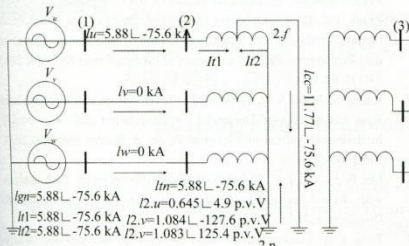


图8 变压器内部故障

Fig. 8 The inner fault of the voltage transformer

图8中可看出,通过使二次回路开路,变压器的高电压绕组中发生故障电流。其原因是对变压器2a-2f段加上电压,该段与段2f-2n存在磁耦合。因此,2分段均产生了磁耦合的电流。

3.2 高压绕组的故障(wye接地)

基于图7结构,将 $p\%$ 值设为从100%(相位到地故障)逐步降为1%(中性点到地故障)。负载被考虑在该情况下,变压器终端随着 $p\%$ 变化走势图,相位b与c说明节点2.a附近故障过压情况,如图9所示。

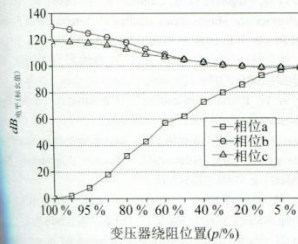


图9 变压器内部故障的wye接地电压

Fig. 9 The voltage of wye with the inner fault of the voltage transformer

电路1-2中相位u、v、w的电流、内部故障电流、发电机接地电流及变压器节点电流,如图10所示。

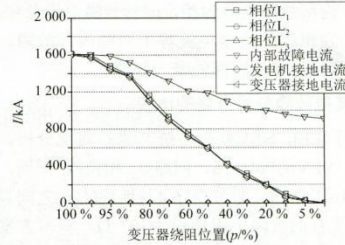


图10 变压器内部故障的wye接地电流

Fig. 10 The current of wye with the inner fault of the voltage transformer

① 相位u的电流与发电机的地极电流以相同的速度降低,其原因为发电机的接地电流等于相位u故障电流与负载非平衡电流之和。② 内部故障电流总是高于相位电流,原因是内部故障电流等于相位电流与变压器绕组中其他部分电流之和。③ 接地变压器的感应电流随着故障中性点移动而增加,该情况由磁耦合与感应电流引起。

3.3 高压绕组的故障(delta接地)

图7中汇流条2与3间连接的变压器变为delta-接地wye变压器, $p\%$ 值从100%变为0%。相位u与v电压的模量变化符合预期,相位c表示故障终端附加的过压情况。变压器终端的相位电压和故障电流的变化情况,如图11和图12所示。

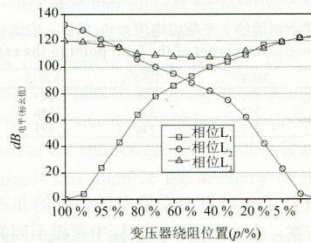


图11 变压器内部故障的delta接地电压

Fig. 11 The voltage of delta with the inner fault of the voltage transformer

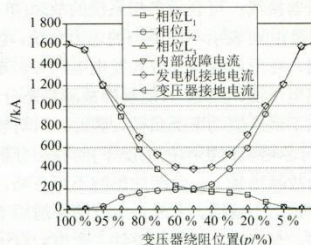


图12 变压器内部故障的delta接地电流

Fig. 12 The current of delta with the inner fault of the voltage transformer

- ① 内部故障电流为相位 u 与 v 故障电流总和。
- ② 发电机的接地电流等于当前内部故障，原因为该路径是电流返回的唯一线路。

3.4 与其他故障分析方案的比较

基于IEEE NEV复杂系统^[16]进行对比分析，选择IEEE NEV的Pole 16、回路4、相位a测试例，故障为将16.4.a接地，即节点16.4与地线(16n)之间具有故障，所有的故障电阻值设为 $10^{-8} \Omega$ 。将本方案与其他几个故障分析方案比较为MUPF^[17]与UDNFA^[18]。算法与MUPF、UDNFA的比较，文献MUPF、UDNFA2个方法的结果极为接近，而MUPF与UDNFA的结果与理论值差别较大，本算法则符合理论值，见表1。

表1 故障点到中性点的3个相位电流大小(单位: A)
Tab. 1 Three-phase current of the fault point to the neutral point

相位	MUPF	UDNFA	本算法
u	171	175	141
v	351	359	376
w	352	348	358

故障点到地的3个相位电流大小，可看出本算法的结果更为准确，并且本算法那故障点到地的电流与故障点到中性点的电流有所差异，可以看出，本算法可较好的仿真中性电缆、地线等电力组件，而MUPF余UDNFA故障点到中性点与到地的电流相等，所以无法较好的表示中性电缆，见表2。

表2 故障点到地的3个相位电流大小(单位: 安培)
Tab. 2 Three-phase current of the fault point to the earth

相位	MUPF	UDNFA	本算法
u	171	175	185
v	351	359	388
w	352	348	331

4 结论

本文设计了一种电力系统多线并发的非对称故障分析方案，本方案可在相坐标中建模不同类型的电力系统，包括同一电路相位间的互阻抗，相同或不同电压级别电路间的互阻抗；可直接表示不同类型的变压器接线；可表示多相系统的故障(单相、二相、三相)；可表示不同类型的电力系统，包括辐射状电网、环形电网与分散式发电电网等。本方案基于节点电压法，因此，只能解决故障稳态分析，所述方法不适合恒功率类负荷，因此，只对较严重故障时(可忽略负荷影响的情况下)的稳态分析有效，较轻的故障场景下，负荷的影响不可忽略，本分析方法理论上不适用，此外，本方法不适用于含分布式电源、含直流、含柔性原件、含电力电子装置的场景。未来将重点研究微电网、智能电网的领域，设计低复杂度且有效的故障分析方案。

参考文献(References)

[1] 邓秋荃, 刘文泰, 孙艳, 等. 基于电力系统实时数据源的BPA软件接口设计[J]. 电网与清洁能源, 2014(12): 15-20.
Deng Q Q, Liu W T, Sun Y, et al. PSD-BPA Interface Design Based on Power System Real-Time Data[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2014(12): 15-20.

[2] Barin A, Canha L N, Abaide A R, et al. Methodology for placement of Dispersed Generation Systems by analyzing its Impacts in Distribution Networks[J]. Latin America Transactions IEEE, 2012, 10(2):1544-1549.

[3] 张禄, 金新民, 战亮宇, 等. 电网电压对称跌落下的双馈感应风力发电机磁链有源衰减控制[J]. 电工技术学报, 2012(9): 191-197.
Zhang L, Jin X M, Zhan L Y, et al. Flux active damping control of the doubly fed induction generator under grid voltage symmetrical dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, (9): 191-197.

[4] 周念成, 罗艾青, 王强钢, 等. 含多感应发电机的配电网短路计算对称分量法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11):65-70.
Zhou N C, Luo A Q, Wang Q G, et al. Symmetrical components method for short-circuit current calculation of induction generators in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 65-70.

[5] Kamel S, Abdel A M, Jurado F. Improved NR current injection load flow using power mismatch representation of PV bus[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 53(4): 64-68.

[6] Lin W M, Ou T C. Unbalanced distribution network fault analysis with hybrid compensation[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(1): 92-100.

[7] Teng J H. Unsymmetrical short-circuit fault analysis for weakly meshed distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 96-105.

[8] Zhou H, Wang R, Cui B. A fault diagnosis method for three-phase rectifiers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 52(1):266-269.

[9] Sadeh J, Bakhshizadeh E, Kazemzadeh R. A new fault location algorithm for radial distribution systems using modal analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 45(1):271-278.

[10] Hooshyar H, Baran M E. Fault analysis on distribution feeders with high penetration of PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):1-1.

[11] Teng Y, Ning L, Li G, et al. Electromechanical transient calculation method and transient characteristics analysis of power system with fractional frequency wind power system[J]. Dianli Xitong Zidonghua/automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2):67-73 and 99.

[12] Filipović G D, Filipović G B, Capuder K. Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 56(3):228-234.

[13] 阎占元, 马金英, 丁振君. 介观RLC电路的量子效应[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(6): 101-103.

[14] Kersting W H. Radial distribution test feeders[J]. Power Systems IEEE Transactions on, 1991, 6(3):975-985.

[15] Medermott T E. Radial distribution feeder and induction machine test cases-steady state solutions[C]. Power Engineering Society General Meeting. 2006:2255-2261.

[16] Kersting W H. Radial distribution test feeders[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2001: 908-912.

[17] Hooshyar H, Vanfretti L. Multiphase unbalanced power flow and fault analysis of distribution networks with high penetration of inverter-interfaced DERs[C]. Applied Electrical Engineering and Computing Technologies. IEEE, 2015: 1-8.

[18] Lin W M, Ou T C. Unbalanced distribution network fault analysis with hybrid compensation[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(1): 92-100.

ISSN 1001-7119

全国中文核心期刊

中国科技核心期刊

科技通报

BULLETIN OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

2018年9月第34卷 第 **9** 期
Vol.34 No.9 Sep. 2018

浙江省科学技术协会主办

Sponsored by Zhejiang Association for Science and Technology



中国·杭州
HANGZHOU CHINA

· 医药、卫生 ·

重组人脑利钠肽治疗老年缺血性失代偿性心力衰竭 朱志军, 吴丹宁(47)

· 农业科学 ·

液相色谱-串联质谱法测定饲料中孔雀石绿及隐性孔雀石绿 于艳丽, 邓 慧(51)

基于支持向量机回归预测水稻叶片 SPAD 值 孙玉婷, 王映龙, 杨红云, 周 琼, 杨文姬(55)

浙江省农业科技“十二五”发展情况及相关对策建议 李明珍, 李金霞(60)

· 工业技术 ·

跨地裂缝浅埋地下管道非线性有限元分析 王 瑞, 胡志平, 魏雪妮(63)

亲水性发泡剂对古建筑屋面防水堵漏效果试验研究 成 帅, 刘 珊(69)

不同排列形式的城市道路景观植被对各类段交通噪声吸收能力的实验研究 董 亮(74)

西成铁路混凝土搅拌站信息化施工对混凝土配料计量控制研究 范文杰(78)

多种施工偏差下预应力混凝土空心板的稳定承载力研究 李 露(82)

顺德区“三旧”改造潜力评价研究 葛爱霞, 梁海锋, 王 璐, 陆上君, 胡月明(87)

基于HSS本构模型的瓯江特大桥钢板桩围堰数值模拟 范大波, 王金昌, 李兴东, 范大军(93)

基于不同测试方法的宁波海相软土电阻率测试研究 李 彪, 刘生财, 曹益明, 蔡国军, 段 伟, 林 军(99)

基于SOC的车用锂电池组双向均衡策略研究 刘成尧, 宋 宏, 刘元春(104)

基于有功备用的双馈风电机组功率优化控制 邢仁周, 徐鹏飞(110)

基于改进型BP神经网络PID的电阻焊机电源恒电流控制 梁明亮, 张桂香, 苏东民(117)

新型阻尼减振电枢离心机振动仿真与试验分析 刘玉聪, 何庆中, 张 城, 刘 怡(122)

激光扫描点云数据库的存储系统设计 唐 宏(127)

山区高速公路高填方边坡稳定性分析 李国强(132)

基于LCL滤波器的三相并网光伏逆变器的控制策略 魏 欣, 孙 玥(137)

基于LabVIEW的氢同位素单质气体定量分装系统 程宏辉, 李 康, 韩兴博, 刘 卫, 李晓林(142)

基于32线激光雷达的道路边界识别算法 王晓原, 孔 栋, 孙 亮, 王建强, 王 方(148)

直接转矩控制的永磁同步电机转速估计 王娟平, 杜 静, 杨苏明(154)

基于Hadoop云平台的集群作业调度算法的研究 王春娟(158)

基于STM32的终端波形优化显示算法 胡胜丰(164)

基于改进BP神经网络的图像识别算法 金红娇(168)

基于改进分水岭算法的彩色图像分割方法 路正佳(172)

基于流量分析的工业控制系统网络安全基线确定方法研究 李 威, 李建俊, 何晓霞, 谢新勤(176)

梯度主动轮廓与曲波变换联合分割方法研究 文 畅, 谢 凯, 张 龙, 贺建颢(180)

基于模糊滑模变结构的磁轴承振动控制研究 孙 磊, 孙冬梅, 袁 倩, 张一豪(186)

基于认知过程的新型人工智能系统设计 王 娅(191)

面向信息无障碍检测的网页距离权重学习方法 王鹰汉, 高 斐, 卜佳俊, 于 智, 陈荣华(195)

云计算海量激光雷达数据动态存储系统设计 侯 婕(201)

直接转矩控制的永磁同步电机转速估计

王娟平¹, 杜静¹, 杨苏明²

(1. 山西电力职业技术学院, 太原 030025; 2. 中电集团 33 研究所, 太原 030032)

摘要:针对超高速永磁同步电机在转速估计中还存在精度较低、误差较大等问题,提出了一种基于直接转矩控制的永磁同步电机转速估计算法。首先构建两相静止坐标系,并在此基础上建立无凸极效应模型,然后将 EKF 应用于超高速永磁同步电机控制系统中,然后对电压空间矢量进行优化,并采用基于定子电压的磁链观测模型进行磁链估计与滞环控制,最后进行磁链估计与滞环控制。算法仿真实验结果表明,本文提出的转速估计算法具有较好的估计结果。

关键词:永磁同步电机;直接转矩控制;转速估计;电压空间矢量;滞环控制

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1001-7119(2018)09-0154-04

DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2018.09.030

Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Estimation

Wang Juanping¹, Du Jing¹, Yang Suming²

(1. Shanxi Electric Power Vocational and Technical College, Taiyuan 030025, China;

2. China Electronics Technology Corporation, the 33rd Institute, Taiyuan 030032, China)

Abstract: In view of the difficulty of installation of high speed permanent magnet synchronous motor position sensor and high requirements, this paper presents a speed estimation algorithm of permanent magnet synchronous motor based on direct torque control. Firstly, the mathematical model of non-salient pole effect in two-phase stationary coordinate system is selected. The EKF is applied to the control system of the super high speed permanent magnet synchronous motor. Then the voltage space vector is optimized and the stator voltage based flux observation model is used. Flux estimation and hysteresis control, and finally flux estimation and hysteresis control. The simulation results show that the speed estimation algorithm proposed in this paper has better estimation results.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; direct torque control; speed estimation; voltage space vector; hysteresis control

随着社会的不断进步,电力电子科技也在不断发展,从而使电机的交流调速技术逐步趋向完善。为了获得高可靠性的交流伺服速度控制,选择优秀的控制平台和最优的闭环控制系统是必不可少的^[1-3]。尤其是在永磁同步电机的伺服控制中,其转速估计尤为重要^[4-7]。

永磁同步电机由于它们的许多优点而被广泛使用。为了优化它的控制性能,使其转速估计的精确度更高、响应的速度更快,且控制调速范围更大,使得与此相关的控制技术得到了快速发展。针对永磁同步电机的参数识别,赵英伟等人^[8]提出了基于 MRAS 的参数辨识方法,提高了参数识别的准确性。

收稿日期:2017-02-01

作者简介:王娟平(1979-),女,汉族,山西太原,研究生,电气与电机控制。

针对电机参数变化对电机控制的误差干扰,张瑞峰等人^[9]提出了一种基于自适应参考优化的永磁同步电机参数识别算法,抑制了电机参数变化的影响作用。针对永磁同步电机参数识别的收敛效率及误差,尹忠刚等人^[10]提出了一种基于级联 MRAS 的 PMSM 参数识别算法。针对电机调速的机制改进,付莉等人^[11]提出了一种基于 MRAS 的 PMSM 电机控制算法。针对 PI 的控制精度较差的问题,朱家厅等人^[12]提出了一直参数动态修正的 PI 控制策略。针对永磁同步电机的负载问题,徐静等人^[13]提出了一种基于 MRAS 的动态过载控制策略,提高了其动态性能。针对 MRAS 参数识别的干扰,周博等人^[14]提出了一直基于模糊算法的 MRAS 控制策略,提高了参数跟踪识别的精度,降低了外部干扰对其的影响。针对电机振动对参数识别的影响,曾智波^[15]等人提出了一种基于滑模观测的电机转速估计算法,并通过实例仿真对该算法进行了验证。

1 永磁同步电机转速估计

根据超高速永磁同步电机的参数要求,以及其 $L_d = L_q = L$ 的特点,建立两相静止坐标系 ($\alpha\beta$), 并构建无凸极效应模型,将 EKF 应用于超高速永磁同步电机控制系统中,估计电机实际转速的具体步骤如下:

(1) 假设其状态变量 $x = [i_\alpha \ i_\beta \ \omega \ \theta \ T_i]^\top$, $u = [u_\alpha \ u_\beta]^\top$, $y = [i_\alpha \ i_\beta]^\top$, 则将其进行非线性化的求解,如式(1)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + B \cdot u(t) + \delta \\ y(t) = Cx(t) + \mu \end{cases} \quad (1)$$

(2) 对式(1)进行优化,得到永磁同步电机线性状态:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}(t) = F(x(t))\Delta x(t) + B \cdot u(t) + \delta \\ \Delta y(t) = C\Delta x(t) + \mu \end{cases} \quad (2)$$

式中, $F(x)$ 是 $f(x)$ 的 Jacobian 矩阵,如式(2)所示:

$$F(x(t)) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x(t)} \quad (3)$$

(3) 对式(2)进行离散化操作处理,得到其离散线性状态方程,如式(4)所示:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = \Phi(k)\Delta x(k) + B(k) \cdot u(k) + \delta(k) \\ \Delta y(k) = C(k)\Delta x(k) + \mu(k) \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\Phi(k) = e^{F(x)T} \approx I + F(x)T \quad (5)$$

$$B(k) = \int_0^T e^{F(x)\tau} d\tau B \approx BT \quad (6)$$

(4) 采用 EKF 进行迭代运算,最终动态更新状态变量 $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^\top$, 得到估计转速 $\omega = x_3$ 。

2 永磁同步电机直接转矩控制

2.1 电压空间矢量优化

根据空间矢量理论,三相定子电压 u_A, u_B, u_C 的合成矢量 u_s 是以电源频率的同步电角速度旋转的电压空间矢量,可表示为:

$$u_s = \frac{2}{3}(u_A + u_B e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_C e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (7)$$

当永磁同步电机运行时,其电压空间矢量如式(8)所示:

$$u_s = \frac{2}{3}U_d e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}} \quad (8)$$

如上式所示,所有永磁同步电机运行状态下的电压空间矢量幅值一样,且差值为 60° ,同时 2 个均处于坐标原点,则其可以用图 1 表示。

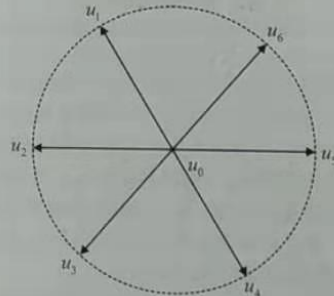


图 1 电压矢量空间位置

Fig.1 Voltage vector space position

2.2 磁链估计与滞环控制

(1) 磁链估计

在直接转矩控制系统中,磁链和转矩被用作控制变量,并且需要磁通和转矩估算的闭环反馈。因此,磁链和转矩估算的精度直接影响到系统的最终控制效果,而磁链和转矩的估算算法是非常重要的。由于通量不能直接测量,所以通常使用定子磁通量通量观测模型。

在 $\alpha\beta$ 坐标系中,可以通过电压等相关参数得到定子磁链 ψ_s 的幅度 $|\psi_s|$ 和相位角 θ_s 。

$$\begin{cases} \psi_{\alpha} = \int (u_{\alpha} - R i_{\alpha}) dt \\ \psi_{\beta} = \int (u_{\beta} - R i_{\beta}) dt \\ |\psi_s| = \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} \\ \theta_s = \arcsin(\psi_{\beta} / |\psi_s|) \end{cases} \quad (9)$$

式中, i_{α}, i_{β} 是由 i_A, i_B, i_C 的测量值, 并通过变换获取, u_{α}, u_{β} 是由 u_A, u_B, u_C 的测量值, 并通过变换获取。

(2) 磁链滞环控制

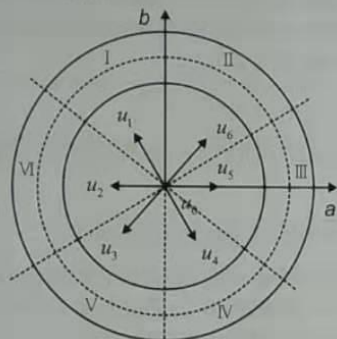


图2 定子磁链滞环控制

Fig.2 Stator flux linkage control

如图2所示,该平面被分成6个区间,每个区间都以基本电压空间矢量为中线,前后扩展 30° ,每个区间跨度 60° ,序号为I,II,...,VI。该图包含3个圆圈,中间虚线圆为定子磁链设定值 ψ_s^* ,两个实线圆是磁链变化的上下限,与虚线圆的距离均为 $|\Delta\psi_s^*|$,即允许误差范围。但是在实际中, ψ_s 在实线圆范围内的取值如式(10)所示:

$$|\psi_s^*| - |\Delta\psi_s^*| \leq |\psi_s| \leq |\psi_s^*| + |\Delta\psi_s^*| \quad (10)$$

为了保证定子磁链以固定的形式运动,就必须对其进行滞环控制。其中,滞环比较器的滞环宽度为 $2|\Delta\psi_s^*|$,该数值的大小对定子磁链运行轨迹和偏离起到了决定性的影响,当 $|\Delta\psi_s^*|$ 数值较大时,定子磁场容易发生低次谐波,产生电流畸变的现象;当 $|\Delta\psi_s^*|$ 数值较小时,容易提高逆变器的开关频率,从而提高了损耗。

通过上述 $|\Delta\psi_s^*|$ 数值的选择,对控制器的数值 $|\psi_s| - |\psi_s^*|$ 进行分析:

1) 当 $|\psi_s| - |\psi_s^*| \geq |\Delta\psi_s^*|$ 时,说明定子磁链正处于外实线圆外,磁链幅值远大于设定的容错阈值 $|\Delta\psi_s^*|$,那么此时就必须对定子磁链的幅值进行

缩小,令 $\psi_0 = 0$;

2) 当 $|\psi_s^*| - |\psi_s| \geq |\Delta\psi_s^*|$ 时,说明定子磁链正处于内实线圆范围里,磁链幅值小于设定的容错阈值 $|\Delta\psi_s^*|$,那么此时就必须对定子磁链的幅值进行扩大,令 $\psi_0 = 1$ 。

2.3 转矩估计与滞环控制

(1) 转矩估计

根据上述得到的定子磁链估值,对其进行转矩估计,如式(11)所示:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n (\psi_{\alpha} i_{\beta} - \psi_{\beta} i_{\alpha}) \quad (11)$$

(2) 转矩滞环控制

转矩滞环调节器通过将转矩的预定数据和实际数据的误差进行对比,从而得到输出信号 T_0 ,根据磁链滞环控制的一般方法,讲转矩滞环控制器的滞环宽度设置成 $2|\Delta T_e^*|$,该数值对转矩波动有着一定的影响作用,当 $|\Delta T_e^*|$ 数值较大时,转矩脉动会变大;当 $|\Delta T_e^*|$ 数值较小时,逆变器的开关频率会随之变大,从而导致损耗的增加,综上所述,就必须选择正确的 $|\Delta T_e^*|$ 。

通过上述方法得到合适的 $|\Delta T_e^*|$ 后,根据滞环控制器分析 $T_e - T_e^*$:

1) 当 $T_e - T_e^* \geq |\Delta T_e^*|$,说明转矩的实际大小已经大于预设的容错阈值 $|\Delta T_e^*|$,这时就需要对转矩进行缩小,令 $T_0 = -1$;

2) 当 $T_e^* - T_e \geq |\Delta T_e^*|$,说明转矩的实际大小已经小于预设的容错阈值 $|\Delta T_e^*|$,这时就需要对转矩进行增大,令 $T_0 = 1$;

3) 当 $|T_e - T_e^*| \leq |\Delta T_e^*|$ 时,说明转矩的实际大小在预设的容错阈值内,这时无需对转矩进行任何操作,令 $T_0 = 0$ 。

3 算法仿真实验

为了验证本文提出的算法的有效性,在MATLAB上对其进行仿真实验,通过模块化集成的思路,构建算法模型,从得到的仿真结果中分析,体现本文提出的算法的先进性。系统总体仿真模型如图3所示。

根据上述模型,对算法进行模拟实验,得到如下实验结果。

(1) 永磁同步电机的响应和误差:

为了方便对其进行分析,等永磁同步电机稳定

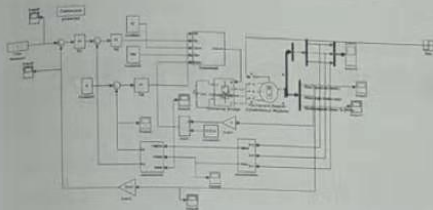


图3 永磁同步电机仿真模型

Fig.3 Permanent Magnet Synchronous Motor Simulation Model

后绘制曲线图。

如上述图4和图5所示,为永磁同步电机的响应和误差曲线图。

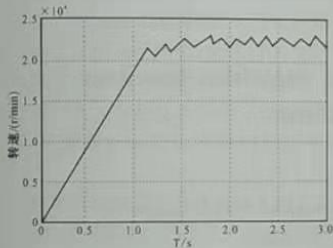


图4 转速响应曲线

Fig.4 Speed response curve

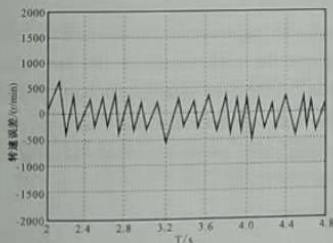


图5 转速响应误差曲线

Fig.5 Speed response error curve

(2) 永磁同步电机的转速估计响应和误差:

从上述仿真结果中不难看出, EKF方法得到的估计值结果更为接近实际值,同时其估计时间较短,正面本文提出的改进算法具有更好的估计结果。

4 总结

由于安装和环境等因素的影响,位置传感器容

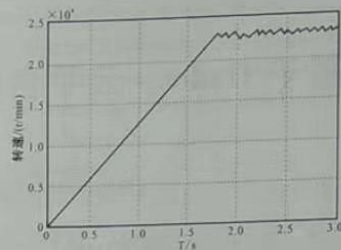


图6 基于EKF的转速估计曲线

Fig.6 EKF based speed estimation curve

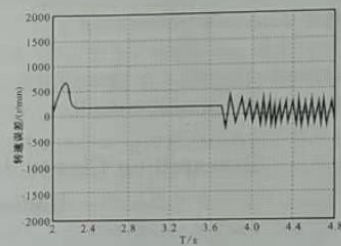


图7 基于EKF的转速估计误差曲线

Fig.7 EKF Based Speed Estimation Error Curve

易出现故障,严重时会造成系统停机的后果,在许多领域,需要通过位置传感器容错控制来处理故障。所以,研究永磁同步电机驱动系统位置传感器的转速估计具有重要意义。对于超高速永磁同步电机位置传感器的安装难点,要求苛刻的特点,设计了永磁同步电机直接转矩控制的速度估算算法,仿真实验结果表明,所提出的转速估算算法具有较好的估计效果。

参考文献:

- [1] David Diaz Reigosa, Daniel Fernandez, ZiQiang Zhu, Fernando Briz. PMSM magnetization state estimation based on stator-reflected PM resistance using high-frequency signal injection [J]. IEEE Journals & Magazines, 2015, 51(5): 3800-3810.
- [2] 谷善茂, 何凤有, 谭国俊, 等. 扩展卡尔曼滤波的PMSM无传感器低速性能研究[J]. 电气传动, 2009, 39(12): 12-18.
- [3] Moon C, Nam KH, Jung MK, et al. Sensorless speed control of permanent magnet synchronous motor using unscented kalman filter [J]. IEEE SICE Annual Conference, 2012: 2018-2023.

(下转第163页)

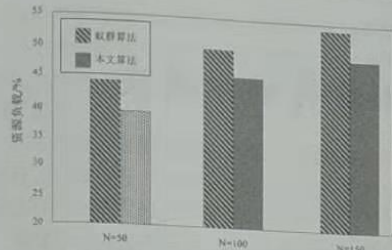


图4 两种算法在资源负载方面比较

Fig.4 Comparison of Two Algorithms' Resource Loading

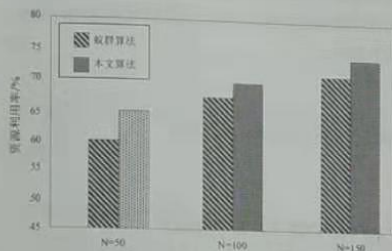


图5 两种算法在资源利用率方面比较

Fig.5 Comparison of Two Algorithms' Resource Utility Rate

法具有一定的稳定性。图5显示了本文算法与基本蚁群算法在资源方面的利用率,从总体情况来看,本文算法要优于基本蚁群算法,资源利用率高。

参考文献:

[1] 胥素芳.基于 GT 的云计算海量作业调度优化[J].科技通报,2015,31(7):167-170

[2] 卢慧.Hadoop 云平台上基于资源预估的作业调度算法[J].计算机应用研究,2016,33(8):2311-2314

[3] 马莉.云计算环境下的动态反馈作业调度算法[J].西安交通大学学报,2014,48(7):77-82

[4] 郭其标.基于云计算 Hadoop 异构集群的并行作业调度算法[J].计算机测量与控制,2014,22(6):1846-1894

[5] 杨倩茹.一种引入内存平衡的 Hadoop 平台作业调度算法[J].小型微型计算机系统,2014,35(12):2708-2712

[6] 曹书豪.一种改进的 Hadoop 多用户作业调度方法[J].计算机应用研究,2015,32(5):1395-1398

[7] 杨海军.云计算环境下人工蜂群作业调度算法设计[J].数学的实践与认识,2012,24(10):115-120

[8] 戴小平.Hadoop 平台下计算能力调度算法的改进与实现[J].计算机工程与应用,2015,10(19):61-65

[9] 李千目.一种 Hadoop 平台下的调度算法及混合调度策略[J].计算机研究与发展,2013,10(S1):361-368

[10] 万聪.基于排队网络的多优先级 MapReduce 作业调度算法[J].计算机工程与科学,2014,36(12):2286-2295

(上接第 157 页)

[4] 聂建华,燕婧婧.基于自适应 EKF 的 PMSM 无速度传感器控制[J].电气传动,2011,41(3):16-18.

[5] 齐放,邓智泉,仇志坚.基于 MRAS 的永磁同步电机无速度传感器[J].电工技术学报,2007,22(4):53-58.

[6] 左瑜君,藤青芳.基于变结构模型自适应观测器的永磁同步电机无速度传感器矢量控制[J].科学技术与工程学报,2014,14(9):49-53.

[7] Mihai C, Todd B. Sliding mode MRAS speed estimators for sensorless control of induction machine under improper rotor time constant [J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007:2226-2231.

[8] 赵颖伟,王毅,李可.基于 MRAS 的改进永磁同步电机参数辨识方法[J].微电机,2014,47(2):29-32.

[9] 张瑞峰,于森林,刘婷,等.基于模型参考自适应的永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J].机电传动,2015,(2):71-76.

[10] 尹忠刚,张延庆,孙向东,等.基于级联 MRAS 的 PMSM 参数在线辨识方法研究[J].电气传动,2015,45(4):19-24.

[11] 付莉,高仕斌,任晓刚,等.基于 MRAS 的 PMSM 无传感器矢量控制研究[J].电气传动,2015,45(10):17-21.

[12] 朱家厅,王莉娜,薛飞.永磁同步电机的滑模 PI 模糊逻辑控制[J].电气传动,2013,43(7):43-48.

[13] 徐静,段芳,江天炎.模糊 MRAS 方法在永磁同步电机无速度传感器控制系统中的应用[J].电机与控制应用,2015,42(12):55-58.

[14] 周博,徐大林,顾兆丹.基于 MRAS 和模糊算法的 PMSM 无传感器控制[J].电子测量技术,2013,36(2):39-42.

[15] 曾智波,周腊吾,黄守道等.改进型滑模观测器在低速永磁同步电机中的应用[J].电力电子技术,2010,44(7):42-44.