输油站场大功率电动机起动后的低压设备压降过大风险数值模拟

李鹏龙

（中国石油天然气管道工程有限公司沈阳分公司，辽宁 沈阳 110000）

摘要：输油站场大功率电动机起动后，会对低压设备产生影响，在对低压设备压降过大风险数值模拟过程中，面对起动设备相对容量改变的情况，模拟数据容易出现异常问题，数值模拟方法的通用性需要进一步提高。针对这一情况，提出输油站场大功率电动机起动后的低压设备压降过大风险数值模拟。根据电动机的起动方式计算出电动机起动电压、电流等参数，在这些参数的作用下，对低压设备状态进行数值处理，确定低压设备运行状态，获得低压设备的动态变化特征，扩充风险数据，按照时刻变化确定风险瞬时值形式，完成对目标的数值模拟。实验结果表明：提出的低压设备压降过大风险数值模拟方法计算误差小，在不同条件下模拟数据紧密度高，整体性能得到了提高。

关键词：大功率电动机；输油站场；低压设备；压降；风险；数值模拟

Numerical simulation of the risk of large voltage drop of low-voltage equipment after starting high-power motor in oil transmission station

LI Penglong

(China Petroleum Pipeline Engineering Corporation Shenyang Branch, Shenyang 110000, China)

Abstract: After starting the high-power motor in the oil transmission station, it will affect the low-voltage equipment. In the numerical simulation process of the risk of excessive voltage drop of low-voltage equipment, in the face of the change of the relative capacity of the starting equipment, the simulated data is prone to abnormal problems, and the universality of the numerical simulation method needs to be further improved. In view of this situation, the numerical simulation of the risk of large voltage drop of low-voltage equipment after the start of high-power motor in oil transmission station is put forward. Calculated according to the startup mode of the motor, motor startup parameters such as voltage, current, under the effect of these parameters, the numerical treatment on the low voltage equipment state, determine the low-pressure equipment running status, obtain dynamic change characteristics of low-voltage equipment, expansion of risk data, according to the time change to determine risk instantaneous value form, complete the numerical simulation of the target. The experimental results show that the proposed numerical simulation method for the risk of large pressure drop of low-voltage equipment has small calculation error, high simulation data input density under different conditions, and the overall performance is improved.

Key words: high power motor; oil transmission station; low voltage equipment; the pressure drop; risk; numerical simulation

0 引言

输油站场大功率电动机起动时存在起动电流大、起动电压低等问题，严重时容易引起欠电压、过载保护动作，导致低压设备停机，因此电动机安全起动问题需要引起高度重视[1-3]。通过对近几年输油站场大功率电动机运行情况的分析，与近些年电力行业内发生多起不同类型的电动机故障事故相结合，提出一些应对措施[4-5]。目前有效的措施有很多，如采取中压固态软起动，在应用上能够有效抑制电流起动倍数[6]。但是，这种解决方式并不一定适用所有电动机，在解决电动机起动风险上还需要采取针对性的措施，这就需要了解电动机起动时的电力参数和低压设备的运行参数，根据这些参数的变化了解低压设备潜在风险，才能更好地解决问题，保证电动机和其他设备安全运行[7-9]。

对输油站场大功率电动机起动后的低压设备进行数值模拟是一个非常有效的方式，国内外专家学者研究了很多可靠的数值模拟方法[10]。如基于深度学习的数值模拟方法、基于有限元分析的数值模拟方法，在使用上都有一定的效果，但是当起动设备相对容量改变后，数值模拟数据容易出现数据丢失、重复、逻辑混乱等异常情况，自身的通用性比较差[11-13]。因此，以输油站场大功率电动机起动情况作为背景，提出低压设备压降过大风险数值模拟，解决常见的数值模拟方法中存在的问题。

1 大功率电动机低压设备压降过大风险数值模拟

1.1 计算电动机起动参数

假设输油站场大功率电动机起动电压下降为额定电压的c倍，则电动机起动参数为

$$\begin{cases} U_{st}=cU_a \\ I_{st}=cI_{sta} \\ T_{st}=cT_{sta} \end{cases} \tag{1}$$

式中，U_{st}为起动电压；U_a为额定电压；I_{st}为初始电流；I_{sta}为起动电流；T_{st}为初始转矩；T_{sta}为起动转矩[14]。

在确定输油站场大功率电动机的起动参数后，与经过数值处理的低压设备状态数据相结合。

1.2 低压设备状态数值处理

由于采集到的低压设备状态数据存在测量误差，因此在低压设备状态数值处理时，采用低压侧三相有功负荷和无功负荷计算功率因数[15]。具体计算式为

$$\begin{cases} \cos x_1=\dfrac{P_x}{\sqrt{P_x^2+E_x^2}} \\ \cos y_1=\dfrac{P_y}{\sqrt{P_y^2+E_y^2}} \\ \cos z_1=\dfrac{P_z}{\sqrt{P_z^2+E_z^2}} \end{cases} \tag{2}$$

式中，$\cos x_1$、$\cos y_1$和$\cos z$为三相功率因数；P_x、P_y和P_z为三相功率；E_x、E_y和E_z为三相电容。

然而，常规方法通过功率因数无法区分出欠补偿和过补偿的状态，为了区别低压侧三相，创新性地对上述功率因数进行简单处理，以区分补偿状态。处理后得到的功率因数为

$$\begin{cases} E_x<0 \quad \cos x_1=-\cos x_1 \\ E_y<0 \quad \cos y_1=-\cos y_1 \\ E_x<0 \quad \cos z_1=-\cos z_1 \end{cases} \tag{3}$$

处理后的功率因数表明，当某相的功率因数为负数时，该相为过补偿。在此基础上，计算出低压设备的电压偏低率、电压偏高率，进而得到电压合格率，用于表示低压设备的运行状态。计算公式为

$$\begin{cases} V_d=\dfrac{V_a}{N}\times 100\% \\ V_g=\dfrac{V_b}{N}\times 100\% \\ V_c=1-V_a-V_b \end{cases} \tag{4}$$

式中，V_d为电压偏低率；V_g为电压偏高率；V_c为电压合格率；V_a为低压设备a相电压偏低的时刻数；N为总时刻数；V_b为低压设备b相电压偏高的时刻数。

通过上述过程确定低压设备的运行状态，用于后续低压设备压降过大风险模拟。

1.3 模拟低压设备压降风险

在模拟低压设备压降风险时，为了解决起动设备相对容量改变后，数值模拟数据出现数据丢失、重复和逻辑混乱等异常问题，创新性地利用低压设备状态分析模型获得低压设备的动态变化特征，将其作为切入点对低压设备的风险进行扩充，通过时间变化曲线和最佳拟合分布函数对低压设备的风险时间服从的分布拟合，最终完成低压设备压降数值模拟。

考虑到后期风险水平与低压设备运行时间相关，计算低压设备的压降风险水平F_1的时域表达式为

$$F_1(t)=S_c(t)+H_c(t) \tag{5}$$

式中，H_c和S_c分别为一次性风险和后期风险，其中一次性风险时按时间t分配，与t呈非线性关系，随着时间的增加呈现出递减趋势。

随着电动机起动频次的增加，低压设备的后期风险逐渐增加，表现为时间的非线性递增函数。具体变化情况如图1所示。

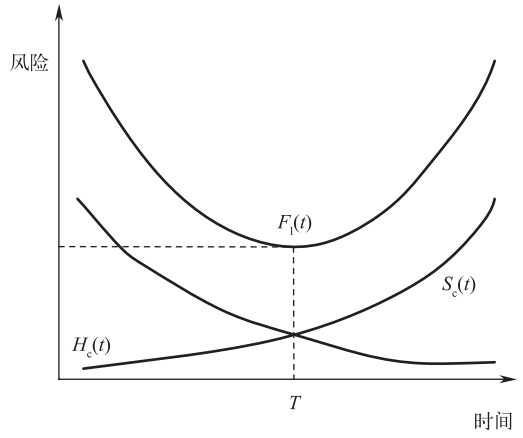


图 1 低压设备的 $F_1(t)$ 曲线

Fig. 1 $F_1(t)$ curve of low-voltage equipment

图1中，$F_1(t)$表示低压设备风险随时间变化的曲线；$S_c(t)$表示后期风险随时间变化的曲线；$H_c(t)$表示一次性风险随时间变化的曲线。根据对以上一次性风险和后期风险的理论分析，设$d(t)$表示低压设备压降风险的最佳拟合分布函数，则后期风险的瞬时值表示为

$$S_c(t)=s_c\cdot d(t) \tag{6}$$

式中，s_c为电动机起动时的初期风险。

计算公式为

$$s_c=\mathrm{oc}+\mathrm{sc}+\mathrm{dc} \tag{7}$$

式中，oc为低压设备的运行风险；sc为低压设备的维护风险；dc为人为因素导致的风险。

综合以上步骤，得到低压设备压降过大风险的瞬时值形式为

$$F_1(t)=\frac{H_c}{t}+s_c\cdot d(t) \tag{8}$$

得到的结果就是t时刻的低压设备压降过大风险数值。至此，低压设备压降过大风险数值模拟完成。

2 实验研究

为深入了解提出的低压设备压降过大风险数值模拟方法的通用性能，以林源、太阳升输油站变电所作为研究对象，设计对比实验方案，在相同实验环境下，通过与常见的数值模拟方法的对比分析，进一步验证提出的数值模拟方法的性能。

2.1 输油站场大功率电动机起动方案设计

考虑实验的严谨性，采用林源站和太阳升站作为实验研究中主要的数值模拟对象。在实验开始前，设计林源站和太阳升站的电动机起动参数，具体见表1和表2。

表 1 林源站电动机起动参数

Tab. 1 Motor starting parameters of Linyuan Station

	名称	输油泵	额定功率/kW	2 450
起动电动机	额定转数	XXX r/min	额定功率因数	0.9
原始数据	起动电流倍数	6	额定电流/A	262
	起动转矩倍数		额定效率	-
母线编号	母线额定电压 /kV		母线电压降（%）	起动时母线电压 /kV
UM1	6.3		13.2	5.47
分析结论	2 450 kW 输油泵电动机可以采用全压起动			

表 2 太阳升输油站电动机起动参数

Tab. 2 Starting parameters of the electric motor at the Sunrise oil transportation station

	名称	输油泵	额定功率 /kW	2 300
起动电动机	额定转数	XXX r/min	额定功率因数	0.91
原始数据	起动电流倍数	6	额定电流 /A	250
	起动转矩倍数		额定效率	-
母线编号	母线额定电压 /kV		母线电压降（%）	起动时母线电压 /kV
UM1	6.3		15.0	5.36
分析结论	2 300 kW 输油泵电动机可以采用全压起动			

按照上述内容起动电动机，经过试运行后，测试低压设备压降数据，获得电动机起动对低压设备的影响曲线，以此验证实验环境与实验目的的一致性，并进行后续对比分析实验。

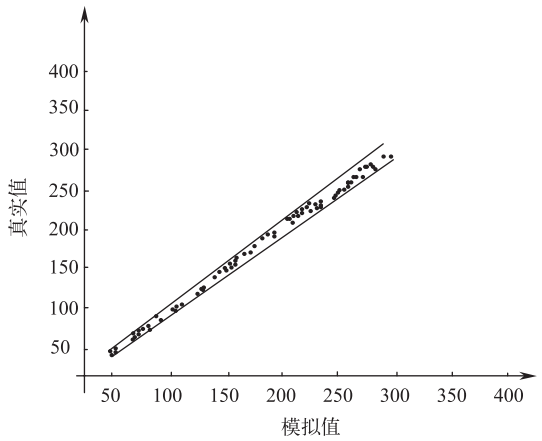
2.2 数值模拟计算结果分析

数值模拟计算实验中，按照上述内容起动电动机，使用不同的数值模拟方法对实验目标进行模拟分析。分析结束后，利用第三方软件ANSYS Fluent 16.0统计出各个数值模拟方法的低压设备压降过大风险模拟值，将其与真实值作对比，得到各个数据点的计算误差，分析各个数值模拟方法的计算能力。实验结果如图2所示。

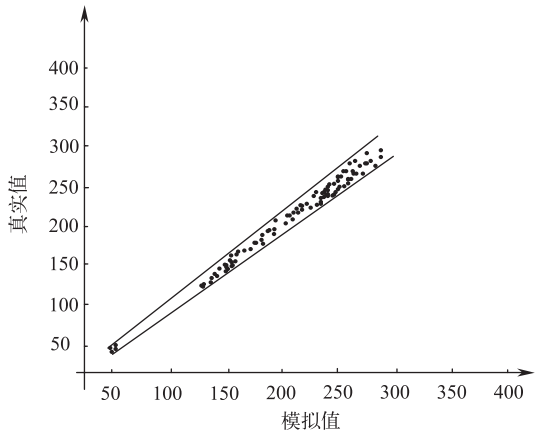
图2中显示的圆点表示数据点，观察图中实验结果可知，基于有限元分析的数值模拟方法数据模拟值与真实值存在比较明显的误差，计算误差在5%左右；基于深度学习的数值模拟方法数据模拟值与真实值存在的误差更明显，计算误差在7%左右；相比之下，提出的数值模拟方法实验结果中，数据模拟值与真实值之间的误差比较小，计算误差在0.8%左右。综上所述，提出的低压设备压降过大风险数值模拟方法计算误差小，数值模拟效果更好，具有先进性。

2.3 模拟数据紧密度实验结果分析

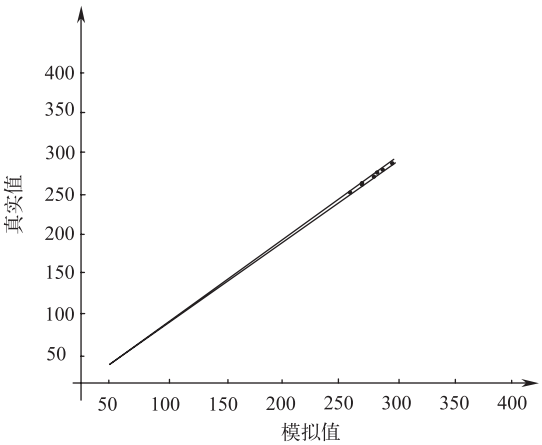
在模拟数据紧密度实验中，以林源站和太阳升站的历史数据为依据，选择林源站1503、1505输油电动机和太阳升站2501电动机作为主要模拟对象，其压降变化情况如图3所示。



（a）基于有限元分析的数值模拟方法实验结果



（b）基于深度学习的数值模拟方法实验结果



（c）提出的数值模拟方法实验结果

图 2 不同数值模拟方法的计算结果分析

Fig. 2 Analysis of calculation results of different numerical simulation methods

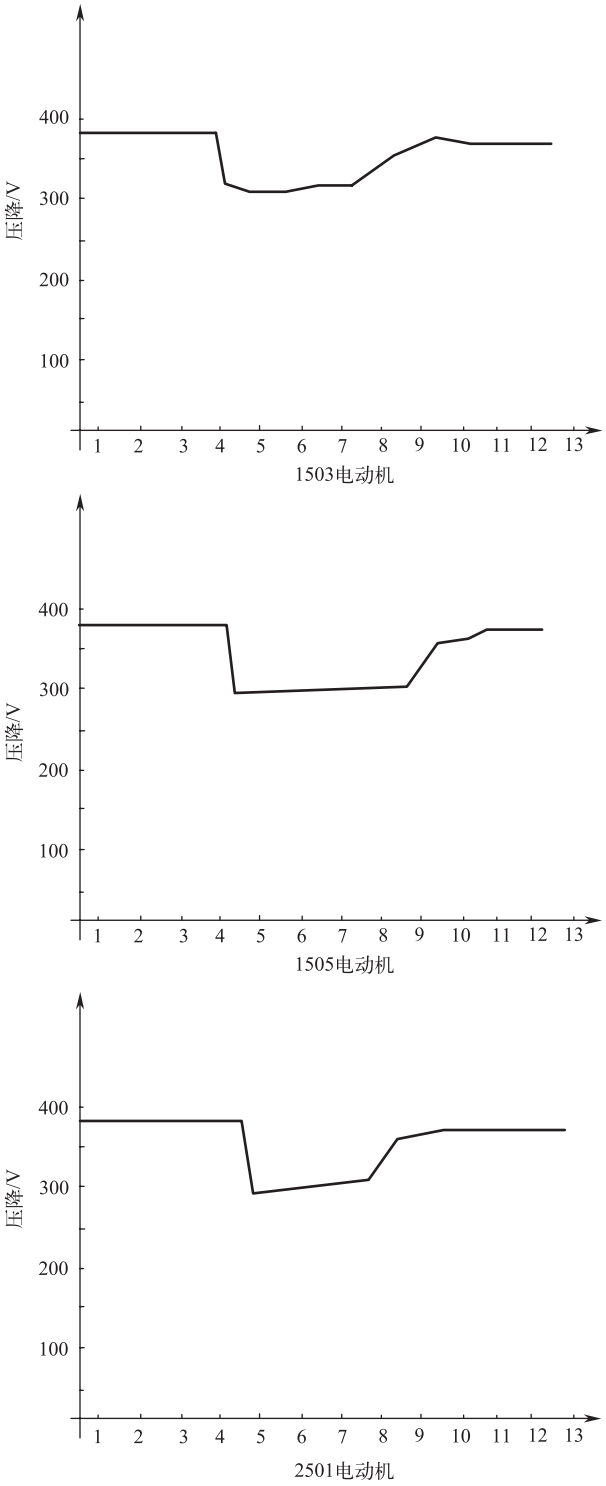


图 3　电动机起动后低压设备的压降变化曲线

Fig. 3 Voltage drop variation curve of low-voltage equipment after starting the motor

通过图3中显示的曲线可以看出，电动机起动对低压侧的影响情况符合实验条件。使用不同的数值模拟方法模拟电动机起动后低压设备的压降情况，在模拟分析结束后，使用计算机软件处理数据，计算出各个模拟方法的数据紧密度。数据紧密度的取值范围在0～1之间，越接近1，说明数据紧密度越好，模拟效果越接近真实情况，具有先进性。经过第三方软件的处理的统计，得到的实验结果见表3。

表 3　不同数值模拟方法数据紧密度实验结果

Tab. 3 Experimental results of data tightness for different numerical simulation methods

	输油电动机	模拟数据紧密度
基于有限元分析的数值模拟方法	电动机 1503（林源站）	0.51
	电动机 1505（林源站）	0.43
	电动机 2501（太阳升站）	0.31
基于深度学习的数值模拟方法	电动机 1503（林源站）	0.67
	电动机 1505（林源站）	0.51
	电动机 2501（太阳升站）	0.27
提出的数值模拟方法	电动机 1503（林源站）	0.93
	电动机 1505（林源站）	0.96
	电动机 2501（太阳升站）	0.94

对比观察表3中显示的实验数据，从中可以看出，在相同的实验条件下，基于有限元分析的数值模拟方法和基于深度学习的数值模拟方法对不同的输油电动机进行模拟，产生的数据紧密度比较低，说明在数值模拟过程中数据连续性差，可能导致数据丢失或其他异常情况，而提出的数值模拟方法实验结果中，数据正常，紧密度高，能够更好地呈现出低压设备压降过大风险模拟效果。结合各个方法的数值模拟计算误差可知，提出的数值模拟方法优于常见的数值模拟方法，具有学术先进性。

3　结束语

在输油站场大功率电动机起动后，引起的电流经常导致低压设备压降过大，影响正常运行。为了避免此类情况出现并造成经济损失，对低压设备压降过大风险进行数值模拟，可有效预防风险发生。本文翻阅了大量资料并设计相应的数值模拟方法，实现了对低压设备压降过大风险的数值模拟，并根据以往的研究经验设计了实验方案，验证了提出的数值模拟方法通用性，证明

了提出的方法具有应用价值，能够有效降低事故的发生风险。但是由于客观条件的限制，本文研究内容还有一些不足，电动机起动时可能出现的问题有不同的类型，本文只针对低压设备压降过大风险展开了研究，对于其他问题还需要进一步完善。

参考文献

[1] 王雪，唐正聪，刘兴杰．基于最优配合效果的电压敏感设备低压脱扣配置策略[J]．电工电能新技术，2021，40(5)：64-72．

[2] 赖承中，钟庆，赵宇明，等．低压直流供电系统电气设备电击风险评估方法[J]．电力系统自动化，2021，45(19)：141-147．

[3] 李玉玺，崔志刚，马素霞，等．分区曳力模型的2D鼓泡流化床流动特性模拟[J]．化学工程，2021，49(1)：49-53，69．

[4] 华绍广，权登辉，杨晓军，等．光催化氧化VOCs净化设备结构优化与数值模拟[J]．工业安全与环保，2020，46(6)：71-76．

[5] 汤振东，郭耸，程洋，等．典型三床RTO设备燃爆危险性数值模拟研究[J]．中国安全生产科学技术，2022，18(8)：189-195．

[6] 魏立新，初勇强，刘芳，等．油田站场输油泵模糊安全评价[J]．流体机械，2021，49(3)：68-73．

[7] 宋怡，陆道纲，秦亥琦，等．迷宫型节流件压降的数值模拟研究[J]．核科学与工程，2020，40(2)：316-324．

[8] 王雪，唐正聪，刘兴杰．电压暂降随机影响下考虑低压脱扣器保护动作机制的电压敏感设备运行状态评估[J]．电工技术学报，2022，37(15)：3794-3804．

[9] 袁亮，杨洁．乏燃料转运设备跌落冲击数值模拟研究[J]．核动力工程，2022，43(2)：122-125．

[10] 常雨芳，高翔，黄文聪，等．基于恒定电流策略的电动机软起动系统研究[J]．电气传动，2020，50(4)：85-88．

[11] 马丽叶，刘建恒，卢志刚，等．基于深度置信网络的低压台区理论线损计算方法[J]．电力自动化设备，2020，40(8)：140-146．

[12] 王流火，孙帅，王增彬，等．变电站设备箱体温、湿度场及凝露的数值模拟[J]．高压电器，2020，56(1)：24-29．

[13] 孙冰冰．油气站场钢筋混凝土基础对管道阴极保护电流需求量影响的数值模拟[J]．腐蚀与防护，2022，43(4)：54-58．

[14] 周雪松，王成龙，马幼捷，等．抑制量测噪声的大功率异步电动机自抗扰矢量控制[J]．中国电力，2021，54(9)：24-33．

[15] 敬佩瑜，郑思佳，张帅，等．输气站场过滤分离器压降与除尘效率变化特性[J]．化工进展，2021，40(10)：5480-5490．

作者简介

李鹏龙（1988—），男，工程师，主要研究方向：长输油气管道站场电力系统及供配电设计。

（收稿日期：2023-03-20）