

大功率电驱离心式压缩机组电压暂降问题 分析与治理

杨丽茹¹, 张啟超¹, 邹涛¹, 马晴¹, 徐方维², 郭凯²

(1. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司输气管理处, 四川 成都 610213;
2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:为有效治理含大功率电驱离心式压缩机组天然气压气站电压暂降问题,文中根据两座含大功率电驱离心式压缩机组压气站(简称压气站)的运行信息,通过分析压气站电压暂降特征水平与站内敏感设备故障概率,提出压气站电压暂降分层分级治理方案。首先,根据压气站的设备参数信息,分析了压气站内电压暂降敏感设备类型、分布与连接关系;然后,分析了站内敏感设备电压暂降耐受机理,结合历史数据通过核密度估计方法拟合压气站电压暂降特征水平,利用能量损失函数评估敏感设备电压暂降故障概率;最后,根据压气站电压暂降特征水平与站内敏感设备故障概率提出了有效的电压暂降问题分层分级治理方案。

关键词:压气站;压缩机组;变频器;电压暂降

中图分类号:TE 88 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)06-0035-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220606

Analysis and Mitigation of Voltage Sag on High-power Motor-driven Centrifugal Compressor Units

YANG Liru¹, ZHANG Qichao¹, ZOU Tao¹, MA Qing¹, XU Fangwei², GUO Kai²

(1. PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company, Chengdu 610213, Sichuan, China; 2. College of
Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In order to effectively control the voltage sag of natural gas compressor stations with high-power motor-driven centrifugal compressor units, a hierarchical mitigation scheme for voltage sag in compressor stations is proposed based on the operation information of two typical compressor stations with high-power motor-driven centrifugal compressor units (hereinafter abbreviated as compressor stations) and by analyzing the characteristic level of voltage sag and the failure probability of sensitive equipment in compressor stations. Firstly, according to the equipment parameter information of compressor stations, the type, distribution and connection relationship of sensitive equipment for voltage sag in compressor stations are analyzed, and then the mechanism of voltage sag tolerance of sensitive equipment in the station is analyzed. Combined with the historical data, the characteristic level of voltage sag in compressor stations is fitted by nuclear density estimation method, and the failure probability of voltage sag of sensitive equipment is evaluated by energy loss function. Finally, according to the characteristic level of voltage sag and the failure probability of sensitive equipment in compressor stations, an effective hierarchical mitigation scheme for voltage sag is proposed.

Key words: compressor station; compressor unit; frequency converter; voltage sag

0 引言

随着中国能源形势的不断紧张和环境问题的突

出,天然气长距离输气管道工程越来越多^[1]。压气站是天然气长距离输气管道工程的重要组成部分,通过站内压缩机组对天然气加压实现天然气远距离输送。一旦发生压缩机组停机,将会造成管网压力降低,影响管网的正常输气任务,造成巨大的经济损失,甚至影响某一区域的稳定^[2-3]。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51877141);西南油气田分公司输气管理处2021年科研计划项目(20210401-08)

某压气站投产后,先后多次发生因电压暂降(石化行业又称“晃电”)导致的压缩机异常停机故障。其中,既有因高压电网电压暂降致使变频器退出运行导致压缩机组停机,也有因低压辅助系统设备遭受电压暂降发生故障导致的压缩机组停机。针对压气站压缩机组电压暂降问题,现有研究主要集中在改变供电方式^[4-5]、加装补偿设备^[6-8]和改造用电设备^[9-10]3个方面:1)改变供电方式是指通过输电侧进行改造,减少压气站的电压暂降频次。文献[4]分析了压气站变电站供电方式、运行方式和负荷分配等对压气站供电可靠性的影响,提出了提高天然气压气站供电系统可靠性的技术措施。文献[5]提出了一种采用柔性直流配电技术供电的压气站供电方案,可以提高压气站供电系统的可靠性。但是柔性直流配电建设周期长、投资较大,且对于现有压气站直流配电改造难度大,难以应用于实际。2)加装补偿设备是指在压气站供电系统中合适位置安装电压暂降治理装置缓解电压暂降造成的影响。文献[6]设计了压缩机组双电源同期自备投装置,发生电压暂降时可以实现双电源无缝切换。文献[7]提出可以采用加装快切装置和动态电压补偿器(dynamic voltage restorer, DVR)来实现压缩机组电压暂降治理。文献[8]提出可以加装防晃电接触器提升压缩机组辅助系统的电压暂降耐受能力。3)改造用电设备是指对压缩机组的主要用电设备进行改造,提升设备的电压暂降耐受能力。文献[9]提出采用Z源逆变器来提高压缩机组变频器的电压暂降耐受能力。文献[10]提出可以通过启用变频器低电压穿越功能来维持电压暂降期间压缩机组的正常运行。

现有文献提出了一些压气站压缩机组电压暂降治理措施,但是没有从压气站内敏感设备电压暂降耐受机理出发,分析压气站敏感设备及其连接关系与电压暂降对压气站生产设备的影响。针对压气站电压暂降特征水平与敏感设备耐受能力,下面提出合适的治理方案。

为了减少压缩机组因电压暂降停机次数,提高压气站电压暂降治理水平,以某2个压气站为例,通过分析压气站电压暂降特征水平与站内敏感设备故障概率提出了压气站电压暂降分级治理方案。首先,分析了压气站内电压暂降敏感设备类型、分布与连接关系;然后,分析了敏感设备电压暂降耐受机理,结合历史数据,基于核密度估计的方法拟合压气

站的电压暂降特征水平,结合敏感设备耐受能力,分析敏感设备对电压暂降的兼容性;最后,根据压气站供用电设备特性提出有效的电压暂降问题分层分级治理方案。

1 压气站电压暂降敏感设备及其连接关系分析

1.1 压气站供用电设备分析

1.1.1 压气站供电系统

压气站变电站主要为站内压缩机组、辅助系统、低压配电设施提供动力电源。以某2个压气站为例,分别记为T站与J站。T站电气接线如图1所示,35 kV变电站主要包含2条35 kV进线回路和3台容量为10 MVA有载调压油浸式变压器。

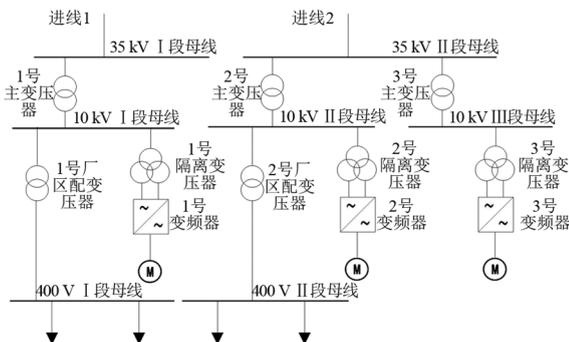


图1 压气站变电站T站电气接线

2条35 kV进线通过3台主变压器降压到3段10 kV母线。3段10 kV母线分别通过3条出线连接隔离变压器,隔离变压器二次侧通过电缆接入变频器,经变频器功率单元调制后引出6 kV馈线为电动机提供动力源,达到调频变速的目的;另外10 kV I段和II段母线分别经2台厂区配电变压器降压到2段400 V母线,为站内低压电气设备供电。

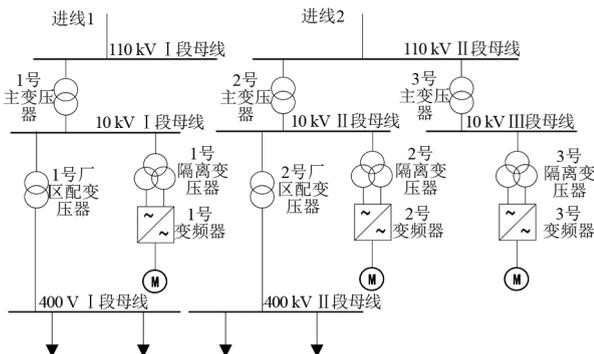


图2 压气站变电站J站电气接线

J 站电气接线如图 2 所示,与 T 站供电结构相似,仅供电电压等级不同,T 站供电电压等级为 35 kV, J 站供电电压等级为 110 kV。

1.1.2 压气站主要用电设备

2 个压气站主要用电设备相同,主要包括 6 kV 电压等级下的压缩机组主系统设备和 400 V 电压等级下的压缩机组辅助设备。压气站主要用电设备如表 1 所示。主系统设备主要包括变频装置、压缩机主电动机;压缩机组辅助设备主要包括空压机系统、压缩机主电动机水冷系统、润滑油系统及后空冷机组。

表 1 压气站主要用电设备

所属系统	设备名称	数量/台
主系统	变频器	3
	三相异步电动机	3
	变频装置功率单元	6
辅助系统	空压机(变频)	2
	空压机(工频)	1
	冷冻式压缩空气干燥机	3
	润滑油泵驱动电动机	6
	油箱加热器	9
	油空冷器电动机	6
	排烟风机电动机	3
	电机水冷系统(增压泵电动机)	6
	电机水冷系统(空冷器电动机)	6
	后空冷电动机(变频)	3
	后空冷电动机(工频)	9
	风机电动机加热器	3
	电磁阀	45
	可编程逻辑控制器	30

1.2 压气站敏感设备连接关系分析

1.2.1 压气站敏感设备分析

压气站压缩机组使用到的电压暂降敏感设备包括变频器、可编程逻辑控制器(programmable logic controllers, PLC)、变频电动机、电磁阀和部分异步电动机。当压气站发生电压暂降时,这些敏感设备会因电压幅值的降低而停机或故障运行。

1) 变频器

主系统变频器的功率单元是变频装置实现变频调速输出的重要结构,额定容量为 8.5 MVA,设置有欠电压保护。压气站变频器结构如图 3 所示。当压气站 10 kV 母线发生电压暂降而使输入电压低于 0.9 倍额定值时,将引起变频装置的欠电压保护动作,使压缩机组转速下降或停机。

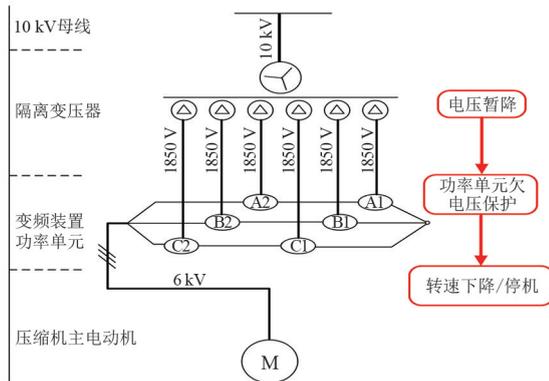


图 3 压气站变频器结构

2) PLC

PLC 电源模块遭受电压暂降时,可能会使电源模块输出电压减小或退出运行,会发生输入模块、输出模块或 CPU 因电源供电不足而出现错误或停止工作^[11]。PLC 电源模块功能结构如图 4 所示。

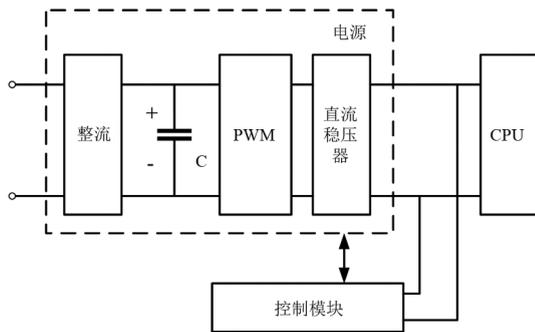


图 4 PLC 电源模块结构

发生电压暂降时,输入电压减小,从而导致直流侧的电容器 C 开始放电,直流侧电压降低,当低于维持直流稳压器正常运行所需的最低电压 U_{min} 时,使得 PLC 模块出现错误或停止工作。

设电源模块暂降期间所连接的负载为恒定功率 P , U_0 为电源模块正常运行时额定输出电压, U_t 为暂降发生 t 秒后直流侧电压,则有

$$Pt = \frac{C}{2}(U_0^2 - U_t^2) \tag{1}$$

如果 $U_0 > U_t$ 且 $U_t > U_{min}$, 则 PLC 仍可继续正常运行一段时间;当 $U_t = U_{min}$ 时,则 PLC 可继续正常运行的最大持续时间 T_{max} 为

$$T_{max} = \frac{C(U_0^2 - U_{min}^2)}{2P} \tag{2}$$

3) 变频电动机

对于压气站内一般的变频驱动电动机,如工艺后空冷风机和变频水冷泵电动机等,变频调速

器(variable-frequency devices, VFD)基本结构如图 5 所示,VFD 由整流器、直流耦合环节、逆变器构成。当发生电压暂降时,输入端电压突然降低,使得直流电容放电,触发欠电压保护跳闸。此外,电压暂降发生后直流电容充电也可能瞬时过电流保护,导致设备停机。VFD 保护措施主要包括欠电压保护和过流保护^[11]。

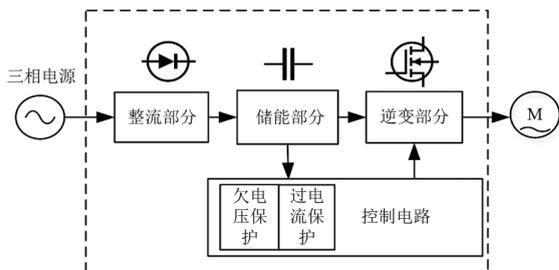


图 5 VFD 基本结构

4) 电磁阀

电压暂降会导致电磁阀的电磁线圈磁能不足而脱扣,使得电磁阀误动作。电磁阀的结构原理如图 6 所示,主要由动铁芯、阀体、电磁线圈和恢复力弹簧组成。电磁线圈通电时,吸引动铁芯动作带动阀芯至相应位置,控制气体通过;电磁线圈断电时,磁力消失,阀芯在恢复弹簧弹力的作用下复位,电磁阀关闭。电磁线圈虽然具有一定的磁储能作用,但在电压暂降期间,如果持续时间稍长,将使得电磁线圈提供的电磁力减小,不能抵消恢复弹簧弹力,从而导致电磁阀关闭。

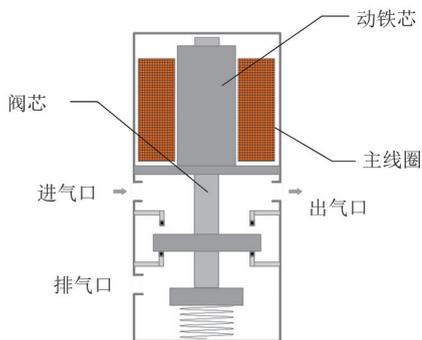


图 6 直动式电磁阀基本结构

小气隙时接触器内瞬时电磁力可以表示为^[12]

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu} = \frac{\Phi^2}{2\mu S} \quad (3)$$

式中: Φ 为瞬时磁通量; μ 为空间磁导率; S 为磁极的横截面积。因此瞬时电磁力与瞬时磁通的平方值有关。设电磁线圈脱离所需的最小电磁力为 F_m 。

此时瞬时磁通为

$$\Phi_m = 2\mu S F_m \quad (4)$$

假定线圈自感是恒定的且对磁通占据主导地位,将 Φ_m 对时间进行微分,并与线圈的总匝数 N 相乘可近似获得使电磁阀保持连通状态的最小电压 U_{\min} 为

$$U_{\min} = \frac{N\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

5) 异步电动机

虽然异步电动机通常对电压暂降不敏感,但因电压暂降产生的许多其他因素会使电动机停运,如转矩振荡、机械涌流等,导致生产过程中断。

1.2.2 敏感设备连接关系分析

压气站内用电设备的电压暂降耐受特性与设备间逻辑连接关系有关。合理刻画压缩机组生产过程中设备间的逻辑关系,是准确描述和分析压缩机组生产过程对电压暂降耐受特性的前提。

1) 主系统

在变频驱动压缩机运行这一过程中,隔离变压器、变频器功率单元与压缩机主电动机构成逻辑串联关系,变频器与压缩机主电动机对电压暂降的响应存在先后次序。变频器驱动压缩机主电动机过程如图 7 所示。



图 7 变频器驱动压缩机主电动机过程

2) 辅助系统

以压气站辅助系统中的水冷系统为例,站内的 3 套变频装置均配有水冷系统,水冷系统的电源分别由相应压缩机 1UMDS 柜提供,额定电压为 380 V。变频水冷系统组成设备如图 8 所示。变频水冷过程的完成包括了 2 台循环泵电动机、1 个电磁阀、2 个电动阀和 6 台水冷风机。当发生电压暂降时,交流接触器、电动阀、电磁阀与水冷风机均同时受到电压暂降的影响,因此构成并联逻辑关系,任一设备的故障均会使变频水冷系统受到干扰甚至过程中断;2 台电动机经交流接触器接入电源,只有当接触器因电压暂降失效跳闸时,电动机的供电才会中断,因此交流接触器与循环泵驱动电动机、交流接触器与补水泵电动机构成逻辑串联关系。

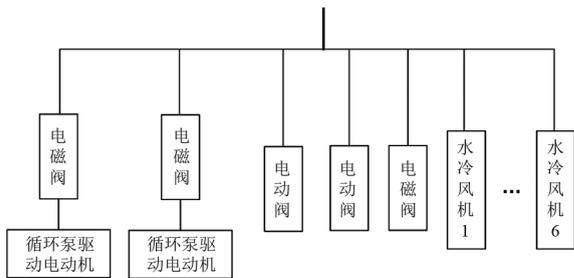


图 8 变频水冷系统组成设备

2 压气站的电压暂降特征水平与敏感设备兼容性分析

2.1 压气站的电压暂降特征水平分析

根据压气站内电压波动事件的记录信息,得到压气站电压暂降事件的频次、持续时间、幅值的分布特点以及对压缩机组运行的影响,是针对性治理电压暂降问题的关键步骤之一。压气站 T 站和 J 站一年内的电压暂降特征分布分别如图 9 和图 10 所示。

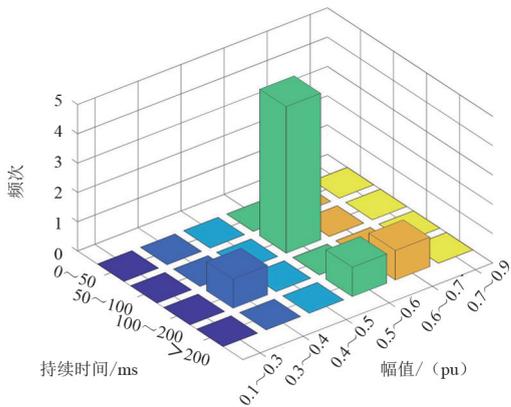


图 9 压气站 T 站 10 kV 母线电压暂降频次

根据监测得到的电压暂降特征分布,基于核密度估计的方法对电压暂降特征分布进行拟合,得到压气站接入点电压暂降特征概率分布。

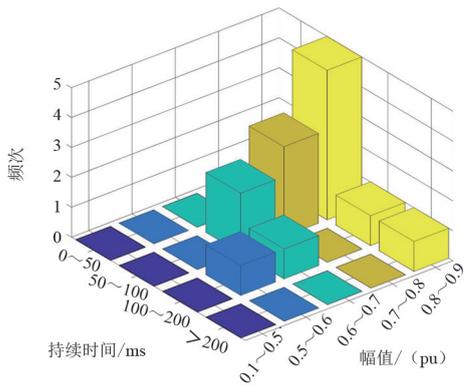


图 10 压气站 J 站 10 kV 母线电压暂降频次

设 U_i 和 T_i 分别为压气站第 i 次电压暂降的幅值和持续时间,则压气站电压暂降的幅值和持续时间的概率密度函数 $f(U)$ 和 $f(T)$ 为:

$$f(U) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{U - U_i}{h}\right) \quad (6)$$

$$f(T) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{T - T_i}{h}\right) \quad (7)$$

式中: h 为带宽; n 为监测到的电压暂降次数; $K(x)$ 为高斯核函数。

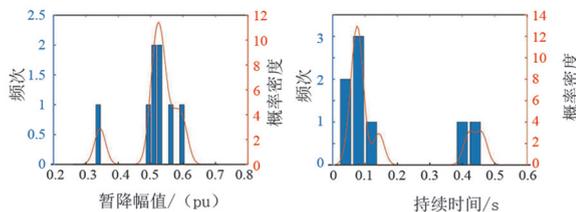
$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (8)$$

当采用高斯核函数时,使核密度估计结果与未知密度函数最接近的最优带宽为

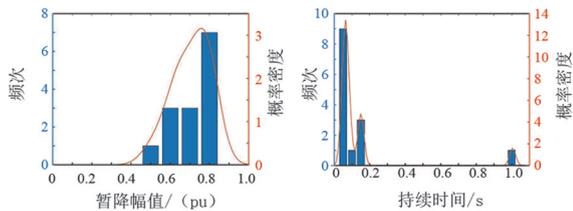
$$h = 1.06\sigma n^{-0.2} \quad (9)$$

式中, σ 为电压暂降样本幅值或持续时间的标准差^[13]。

分别对一年内压气站 T 站的 8 次和 J 站的 14 次电压暂降样本进行处理,压气站 10 kV 母线电压暂降特征概率分布如图 11 所示。



(a) 压气站 T 站接入点电压暂降特征概率分布



(b) 压气站 J 站接入点电压暂降特征概率分布

图 11 压气站 10 kV 母线电压暂降特征概率分布

如图 11 所示,T 站的电压暂降幅值大多分布在 0.5~0.6 倍额定值,持续时间大多分布在 50~200 ms; J 站电压暂降事件的暂降幅值分布在 0.5~0.9 倍额定值区间,多数电压暂降事件分布在 20~200 ms 区间。相较于 J 站,T 站的电压暂降较为严重,所发生电压暂降多为深度暂降,且发生过空压机、润滑油泵电机等低压用电设备停机的情况。造成这一情况的原因,主要为 T 站的供电电压等级为 35 kV,接入区域配电网系统;而 J 站供电电压等级为 110 kV,

且为专线供电,上游变电站为 220 kV 主网变电站,短路故障发生概率小。因此,J 站电压暂降水平要优于 T 站。

2.2 敏感设备兼容性分析

根据 2.1 节获得的电压暂降特征水平分析压气站内电压暂降敏感设备的兼容性。评估电压暂降对各用电设备的影响,确定电压暂降发生时设备运行状态的变化情况,为电压暂降治理方案制定提供各设备的补偿裕度。

2.2.1 压气站敏感设备耐受能力

压气站变频驱动控制系统设置有变频器输入欠电压保护,阈值为 0.9 pu,其耐受特性曲线如图 12 所示,当压气站 10 kV 母线因电压暂降导致变频器输入电压低于此阈值时,压缩机组将降低转速或联锁停机。

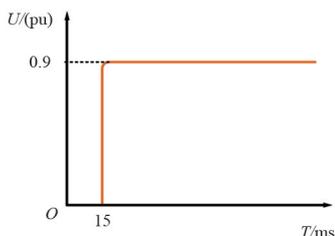


图 12 压气站主变频器电压耐受曲线

对于压缩机组辅助系统敏感设备而言,不同于主变频器的闭锁条件设置,这些低压敏感设备的耐受曲线上存在不确定区域,当电压暂降事件处于不确定区域时,其耐受特性将存在模糊性,设备运行状态的改变情况将以概率形式出现。并且由于辅助系统设备状态监测不够全面,而辅助系统设备停机也会影响压缩机组的正常运行,因此需要评估辅助系统设备电压暂降的影响程度,确定辅助系统设备电压暂降治理范围。

将辅助系统敏感设备耐受曲线的不确定区域划分为 3 个子区域,如图 13 所示,提出 2 个假设:1) 发生电压暂降时,暂降幅值和暂降持续时间是两个独立的随机变量;2) 发生电压暂降时,暂降幅值或持续时间若位于限值之外,设备故障率仅与另一个因素有关。

在图 13 中, U_{\max} 和 U_{\min} 分别为电压暂降幅值耐受范围的最大值和最小值; T_{\max} 和 T_{\min} 分别为电压暂降持续时间耐受范围的最大值和最小值。电压暂降

敏感设备的运行状态在耐受曲线上可分为正常运行区域、故障区域和不确定区域。曲线 1 的外部区域 ($U > U_{\max}$, $T < T_{\min}$) 为设备正常运行区域;曲线 2 的内部区域 ($U < U_{\min}$, $T > T_{\max}$) 为设备故障区域;曲线 1 和曲线 2 之间为设备运行不确定区域,包括 A 区域 ($U_{\min} < U < U_{\max}$, $T_{\min} < T < T_{\max}$)、B 区域 ($U < U_{\min}$, $T_{\min} < T < T_{\max}$) 和 C 区域 ($U_{\min} < U < U_{\max}$, $T > T_{\max}$) 3 个部分。

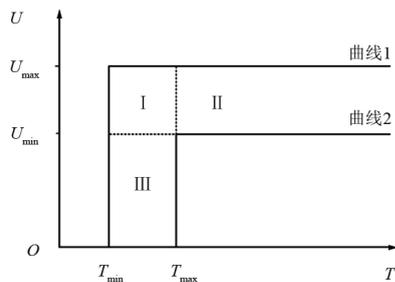


图 13 敏感设备耐受曲线

根据同类型设备的耐受特性测试结果,压缩机组辅助系统主要敏感设备的耐受范围限值 U_{\max} 、 U_{\min} 、 T_{\max} 和 T_{\min} 见表 2。

表 2 压气站敏感设备的耐受范围限值

设备类型	$U_{\max}/(\text{pu})$	$U_{\min}/(\text{pu})$	T_{\max}/ms	T_{\min}/ms
PLC	0.90	0.30	400	20
变频电动机	0.71	0.59	175	15
电磁阀	0.60	0.35	10	5

2.2.2 压气站敏感设备故障概率

对于敏感设备,故障率取决于电压暂降能量损失的大小。因此参考能量损失公式^[14],按暂降所处不确定区域,敏感设备故障率 P 可计算为:

$$P_B = \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, (U_i, T_i) \in B \quad (10)$$

$$P_C = \frac{U_{\max}^2 - U^2}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2}, (U_i, T_i) \in C \quad (11)$$

$$P_A = \frac{U_{\max}^2 - U^2}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\min}}, (U_i, T_i) \in A \quad (12)$$

综上所述,故障率的计算步骤为:1) 根据暂降的幅值和持续时间,确定暂降位于哪个区域;2) 当暂降处于正常运行区域或故障区域时,故障率分别为 0 或 1;3) 若暂降处于不确定区域,则需根据式(10)、式(11)或式(12)计算相应的故障率。

根据压气站电压暂降监测结果,2 个站辅助系

统敏感设备年故障次数如图 14 所示。

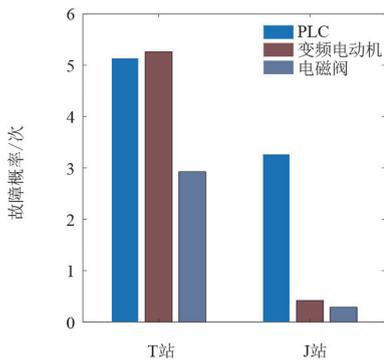


图 14 敏感设备年故障次数

对于压气站 T 站,由于电压暂降幅值较低,对设备造成的影响较为严重,因此,需要对辅助系统敏感设备中的 PLC、变频电动机和电磁阀均采用相应的治理措施,同时需要在 400 V 母线上加装电压暂降治理装置,对整个辅助系统进行治理。而对于 J 站,则仅需针对 PLC 设备进行治理,由于 PLC 设备容量较小,故可采用不间断电源 (uninterruptible power supply, UPS) 进行电压暂降治理。

3 压气站的电压暂降治理措施

3.1 案例分析

以 2020 年 6 月 18 日压气站 T 站发生的一次因电压暂降导致压缩机组停机的的事件为例。由于压气站变电站上游的 110 kV 变电站母线电压波动,电压暂降经 35 kV 进线 2 传导至压气站变电站 T 站。

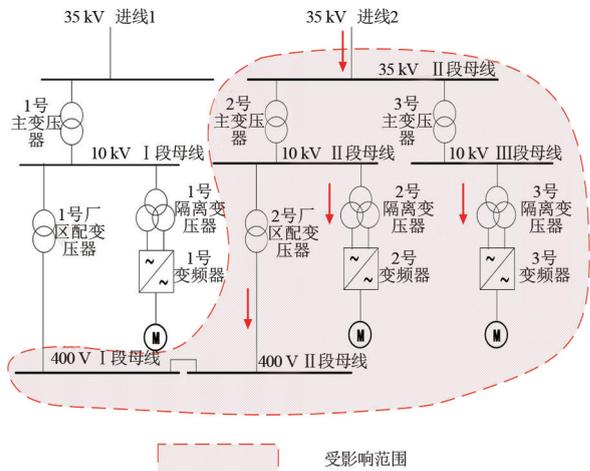


图 15 压气站电压暂降影响范围

压气站电压暂降影响范围如图 15 所示。由于电压暂降在变压器中的单向传递特性^[17],即电压暂

降只能从高压侧传导至低压侧,无法反向传导,因此 35 kV II 段母线电压暂降经过站内 2 号、3 号主变压器,同时使 10 kV II 段、III 段母线发生电压暂降,电压幅值跌落至 0.6 pu 左右,并持续了大约 23 个周波。2 号变频器与 3 号变频器均因电压暂降触发了输入欠电压保护。2 号变频器报警未停机,3 号变频器因此次电压暂降报警并停机,同时引起了站内 400 V I 段、II 段母线电压暂降。虽然,400 V I 段母线暂降,但是无法通过 1 号厂用变压器传导至 10 kV I 段侧。

此次暂降造成 3 号压缩机组辅助设备中 2 号润滑油泵电动机停机,3 台后空冷风机电动机和 3 台空压机停机。10 kV II 段、III 段母线电压波动情况见图 16,10 kV I 段母线运行正常。

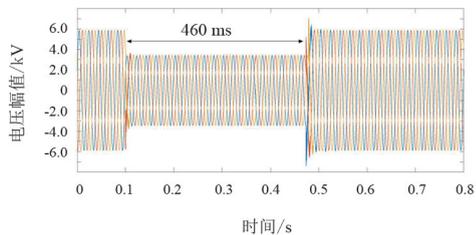


图 16 10 kV II 段、III 段母线电压波动情况

此次电压暂降事件造成了压气站主系统变频器停机,辅助系统中大面积设备停机,从停机至恢复正常运行耗时 2 h,严重影响了压气站的正常输气任务。

3.2 压气站电压暂降分层分级治理方案

为了有效地治理压气站电压暂降问题,根据压气站电压暂降水平,提出压气站电压暂降分层分级治理方案,如图 17 所示,方案包括场站级治理、主系统级变频器治理和辅助系统级治理 3 个部分。

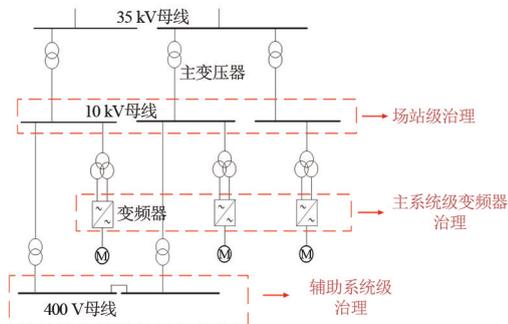


图 17 压气站电压暂降分层分级治理方案

场站级治理通常采用快切装置,即在 10 kV 母线侧加装固态切换开关装置 (solid state transfer switch, SSTS) 来实现;主系统级变频器治理采用更改变频器闭锁条件实现;辅助系统级治理采用加装电压暂降治理装置实现。

3.3 加装固态切换开关装置

由于压气站均采用两回独立进线供电,当其中一回进线发生电压暂降时,可通过 SSTS 切换装置切换至另一回进线。基于晶闸管投切控制的 SSTS 能快速地将敏感负荷由故障常用电源切换至备用电源,并在故障恢复时将负荷切换回常用电源^[16]。

如 3.1 节中的案例所示,由于进线 2 的影响,压气站 10 kV II 段、III 段母线发生电压暂降,但 10 kV I 段母线运行正常。因此,可以通过 SSTS 切换装置将 10 kV II 段、III 段母线切换至进线 1。

SSTS 安装后正常运行时断路器位置如图 18 所示。正常运行时,10 kV 母线各自的断路器闭合,I 段和 II 段母线间的 04 母联断路器断开。当 35 kV II 段母线发生电压暂降时,35 kV II 段母线发生电压暂降时开关位置如图 19 所示,10 kV II 段、III 段母线 02、03 断路器断开, I 段和 II 段母线间的 04 母联断路器闭合,10 kV II 段和 III 段母线切换至进线 1 供电。

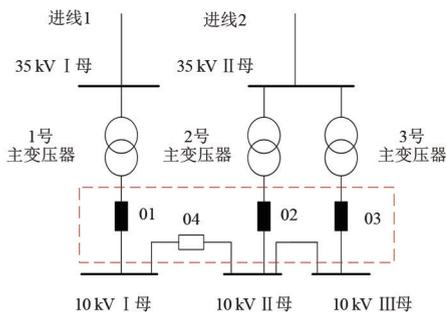


图 18 正常运行时断路器位置

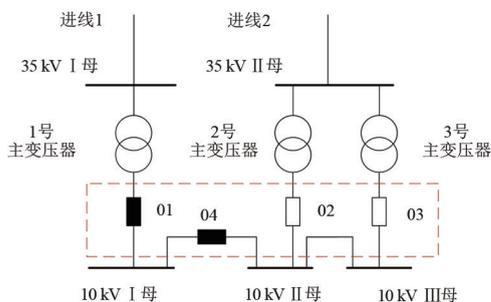


图 19 35 kV II 段母线发生电压暂降时断路器位置

对压缩机组进行建模仿真以验证治理方案的有效性,电压暂降幅值设置为 0.6 pu,持续时间为 400 ms。通过分析安装 SSTS 前后暂降期间的压缩机组转速变化情况仿真验证治理方案的有效性,治理前后压缩机转速 r_w 如图 20 所示。

根据图 20 所示,安装 SSTS 后压缩机组转速可

以维持在一个较为稳定的运行状态,通过安装 SSTS 可以保护压缩机组主系统不受电压暂降影响。

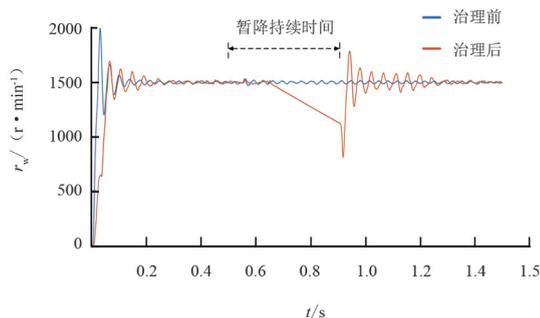


图 20 治理前后压缩机转速

3.4 更改变频器闭锁条件

由于压缩机组主系统变频器功率较大,无法通过储能类电压暂降治理装置进行治理。并且,通常电压暂降的持续时间较短,而变频器具有一定的低电压穿越能力,在发生幅值较高的电压暂降时,可以适当减小变频器的输出功率,使压缩机组转速下降。由于存在压缩机组转动惯量,此时能量由电动机反馈至变频器直流母线上,使直流母线电压维持在正常工作范围内不致变频器跳闸,电网电压恢复后变频器也恢复至正常运行状态。

电压暂降设置与图 20 相同,调整变频器的闭锁条件前后的压缩机转速 r_w 如图 21 所示。

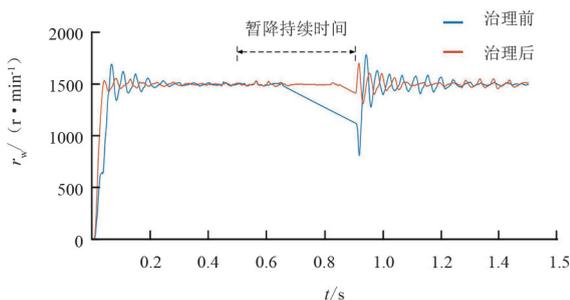


图 21 调整变频器的闭锁条件后压缩机转速

由图 21 可知,调整变频器的闭锁条件后,压缩机组转速虽然在电压暂降期间仍有波动,但相较于原闭锁条件,转速可以维持在一个较为稳定的运行状态。

3.5 辅助系统加装电压暂降治理装置

辅助系统中的敏感设备由于功率较小,且辅助设备停机也会对压缩机组正常运行造成影响,因此,可采用在 400 V 母线上安装电压暂降治理装置来维持供电稳定。由于 DVR 具有响应快、效率高的特点,

是目前较为常用的电压暂降治理装置^[18]。因此,可以在压气站400 V母线上串联DVR,在电网发生电压暂降时,DVR将自动输出一个差值电压,来补偿电网电压的降落,确保辅助系统负荷供电稳定。

3.6 其他措施

此外,还可通过对电网侧进行改造,包括更换电缆供电、定期清理架空线附近异物、定期清洗绝缘子降低污闪率、定期进行设备检修降低设备故障率和配电网小电阻接地改造等来减少电压暂降发生,从而缓解电压暂降对压气站的影响。

4 结 论

上面分析了2个压气站的电压暂降特征水平与敏感设备故障概率,并提出了有效的电压暂降分级治理方案。所提分级方案针对压气站不同电压等级用电设备,可以改善压气站电能质量水平,缓解电压暂降对压气站生产运行的影响。

参考文献

- [1] 夏雪,李嘉逸,余熙,等.四川省能源互联网发展路线研究[J].四川电力技术,2017,40(5):73-77.
- [2] 赵霞,戴蓉,王璐,等.考虑压气站运行特性的电-气最优能流两阶段方法[J/OL].中国电机工程学报:1-15 [2022-07-09]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211921.
- [3] 樊国旗,霍超,李小腾,等.含P2G的多能源网优化调度研究[J].四川电力技术,2022,45(2):67-73.
- [4] 尹贻功,宋宏志,王天文,等.提高压气站供电系统可靠性的技术措施[J].电气技术,2014(10):59-66.
- [5] 李福荣.天然气长输管道电驱压气站柔性直流配电技术探讨[J].电器工业,2020(10):68-71.
- [6] 文彬.输气管道大功率变频器失电跨越研究[J].电气时代,2017(7):82-85.
- [7] WU LF, YU X W, OU-YANG B Y, et al. The influence of voltage sag on gas compressor station and its treatment measures [C]//Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Systems Conference, Singapore, 2022:803-813.
- [8] 卓麟.天然气长输管道离心压缩机不间断运行的研究

与实现[J].电器工业,2019(8):73-78.

- [9] BELSKY A A, SALOV R A. Balanced voltage sag compensation on adjustable speed drive of a gas compressor [C]//2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2019:934-398.
- [10] 谢锐,杜权.电网波动对变频电驱压缩机组的影响及应对策略[J].油气田地面工程,2019,38(S1):147-148.
- [11] XU Y H, WU Y P, ZHANG M M, et al. Sensitivity of programmable logic controllers to voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 34(1):2-10.
- [12] 徐永海,兰巧倩,洪旺松.交流接触器对电压暂降敏感度的试验研究[J].电工技术学报,2015,30(21):136-146.
- [13] XU Y H, LU W Q, WANG K, et al. Sensitivity of low-voltage variable-frequency devices to voltage sags [J]. IEEE Access, 2018, 7:2068-2079.
- [14] 周晓敏,葛少云,李腾,等.极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J].中国电机工程学报,2018,38(2):505-513.
- [15] 周翔,王丰华,黄荣辉,等.考虑系统与敏感设备的变电站电压暂降综合评估[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1940-1946.
- [16] 姜欢笑.双电源快速切换装置在电驱压气站中的试验及分析[J].电世界,2015,56(1):30-33.
- [17] 陶顺,肖湘宁.中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(二)[J].电工技术学报,2007(10):156-159.
- [18] 黄瑞,肖先勇,陈振.基于过程免疫力的动态电压恢复器优化配置[J].四川电力技术,2019,42(3):50-55.

作者简介:

杨丽茹(1976),女,硕士,工程师,从事电气及机动设备管理工作;

张启超(1986),男,工程师,从事天然气输气生产管理工作;

邹涛(1971),男,工程师,从事油气储运管理工作;

马晴(1986),女,工程师,从事信息水电管理工作;

徐方维(1978),女,博士,副教授,主要研究方向为电能质量及谐波等;

郭凯(1997),男,博士研究生,主要研究方向为电压暂降分析与治理相关研究。

(收稿日期:2022-10-26)