

大功率压缩机变频器低电压穿越功能故障分析及措施

蒲斌,陈眉生,程遥遥,赵霞

(中国石油西部管道公司,新疆 乌鲁木齐 830013)

摘要:从电压跌落及转速变化分析,变频器有足够时间实现旋转再启动,根据电压暂降的特征及低电压穿越功能运行过程中的过电流故障,深入分析了产生过电流的原因,提出过电流故障的解决方案,根据不同特征的变频器可以采用升级检测算法或复位报警的方式解决过电流故障,同时对变频器其他低电压穿越的故障进行了分析,最后分析了低电压穿越功能的现场测试方法,并对变频器低电压穿越历史记录进行检查。

关键词:变频器;低电压穿越;过电流;电压跌落

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19889

Fault Analysis and Measures for Low Voltage Ride Through Function of High Power Compressor Unit

PU Bin, CHEN Meisheng, CHENG Yaoyao, ZHAO Xia

(Petro China West Pipeline Company, Urumqi 830013, Xinjiang, China)

Abstract: According to the analysis of voltage drop and speed change, the converter has enough time to realize rotary restart. According to the characteristics of voltage drop and the over-current fault during the operation of low voltage ride through (LVRT) function, the causes of over-current were analyzed in depth, and the solution of over-current fault was proposed. According to different characteristics, the inverter can solve the over-current fault by using the upgrade detection algorithm or resetting the alarm. At the same time, the other LVRT faults of the inverter were analyzed. Finally, the field test method of the LVRT function was analyzed, and the LVRT history of the inverter was checked.

Key words: inverter; low voltage ride through (LVRT); over-current; voltage drop

压缩机是天然气管道压气站的主要设备^[1],按驱动方式分为燃驱和电驱^[2]。电驱压缩机组在经济性、环保性等方面有很大的优越性^[3-4]。随着电网的覆盖,越来越多的电驱压缩机组应用于天然气管道。

相较于燃驱机组,电驱机组具有效率高、运行维护成本低等优点,使电驱机组安装数量不断增加。我国幅员辽阔,上网电源多样,对于部分地区,地方供电主要采用风电、光伏发电,上网电能质量本身不高,特别在大风恶劣天气时,造成线路供电质量短时段骤降,会造成变频器由于电能质量造成停机,给生产造成了损失。据统计西二线3座电驱站自投产至2016年9月共发生49次因电网波动造成的电驱压缩机组停机,西二线某

站2018年全年因外电波动导致压缩机组停机6次,占全年非计划停机比例为87.5%。因此,具备低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)性能的变频器在电能质量低地区非常重要。对变频器低电压穿越的理论研究较多,但是在实际应用中各种故障造成低电压穿越失败的研究较少,分析与处理变频器低电压穿越过程中产生的各种故障,以提高变频器低电压穿越性能尤为必要。

1 低电压穿越相关概述

LVRT起源于对风力发电系统的研究^[5-7],目前各国风力发电系统与光伏发电系统均有较完备的低电压穿越规范及要求,而在其他方面的应用及规范较少^[8]。

IEEE将电压暂降定义为供电电压有效值突然下降到额定值的90%~10%,持续时间为0.5~30个工频周期^[9]。对西二线某站2018年的电压暂降情况进行统计(暂降90%~10%),结果如表1所示。

表1 电压跌落统计
Tab.1 Voltage drop statistics

序号	跌落幅度/%	跌落时间/ms	跌落速率/(%·ms ⁻¹)
1	68	60	1.54
2	72	75	1.40
3	74	60	1.74
4	76	90	1.27
5	76	60	1.42
6	86	90	0.74
7	87	100	0.69
8	88	90	0.69

由表1可知,西二线某站发生电压跌落幅度超过90%的频率较高,平均为0.67次/月;跌落幅度在68%~88%;跌落时间均在60~100 ms,时间较短;跌落速率较快。

根据对西二线某站故障停机时转速下降进行分析,机组在故障停机前30 s内下降速率较快,下降速率约为97 r/s。与电压跌落的时间周期相比,电压跌落期间造成的转速下降不明显,有足够的变频器响应时间以完成低电压穿越。

对于低压变频器的LVRT有很多的实现方式,给变频器加装低电压穿越电源装置、直流母线加装蓄电池组、交流不间断UPS等^[10-12],但是对于大型电驱管道压缩机组,目前以电压源的变频器^[13]为主,15 MW以上的功率,这些方案成本较高,实现方式不经济,同时,对于已经完成现场安装投产的变频器,更改硬件设计显然很不经济,因此通过对变频器控制程序及保护参数进行修改,从而实现低电压穿越功能是可行的方式,这种实现方式一般称为自复位再启动^[14],也称为旋转再启动或飞车启动。

2 低电压穿越中的故障分析及措施

发生网测电压跌落时,不同厂家的变频器采用的低电压穿越方案均是:检测到电压跌落→闭锁输出→检测电压恢复→旋转再启动。

这个过程中,面临的主要问题是变频器过电流导致低电压穿越失败,同时还有直流母线电压保护及其他保护导致低电压穿越失败。

2.1 变频器过电流的原因及处理

2.1.1 变频器进入低电压穿越前过电流

图1为某15 MW变频器在电压跌落过程

中,还未进入低电压穿越状态,即发生输出电流超过停机保护值引起停机的曲线图。此时变频器网侧低电压保护值为8 500 V,由于电压下降过快,在低于8 500 V时未及时闭锁输出进入低电压穿越状态,造成输出电流超过保护值,引起停机。

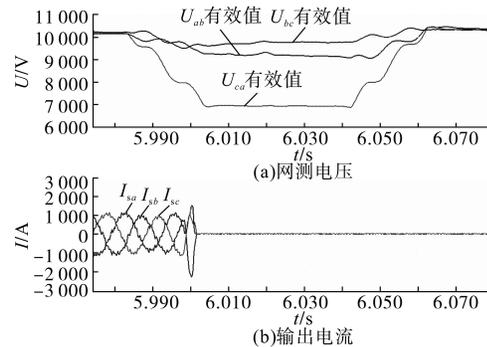


图1 某15 MW变频器过电流停机曲线

Fig.1 Over-current outage curves of a 15 MW Inverter

变频器在电压跌落过程中产生的过电流,原因有以下2个方面:

1)网侧电压开始跌落时,无控整流后的直流母线电压同时开始下降,由于变频器还未闭锁输出,将保持输出功率不变,输出电压降低,引起输出电流增大^[15]。

2)同步电机正常运行时,电机感应电压与变频器输出电压平衡,当发生电压暂降时,变频器的输出电压与电压暂降同步下降,电机的感应电压与变频器的输出电压产生电压差,形成感应电流,与负载电流合成,瞬间超出系统保护定值,引起过电流^[16]。图2为电压暂降造成的感应电压与输出电压合成的总电流。

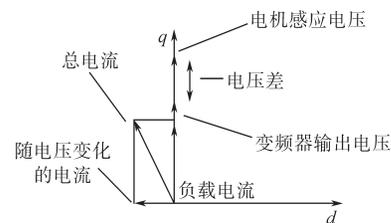


图2 电压暂降引起过电流

Fig.2 Over-current caused by voltage Dip

为了避免引起这两部分电流叠加后造成总电流过流引起机组停机,造成低电压穿越失败,有以下2种解决方案:

①提升检测方案,同时根据不同的变频器容量等级,选择合适的低电压穿越保护数值,及时闭锁输出,防止产生过流。

避免在电压跌落期间产生过电流最有效的

方式是在电压跌落至保护值时尽早闭锁输出,减少两部分叠加电流。因此可以升级检测算法,及时闭锁输出,降低负载电流,以避免产生过流。而对于能够及时检测出电压检测幅度的算法,对系统硬件的要求较高,消耗的系统资源较大,荣信变频器控制器运算能力较强,通过升级检测算法,降低检测电压跌落时间,以提早闭锁输出,防止产生过电流。同时,由于荣信变频器设计的额定容量裕量较高,提早闭锁输出可以防止产生电流过流。

针对不同设计裕量的变频器,采用不同的保护定值。对两级级联的15 MW变频器,将低电压穿越的保护定值设定为90%即9 000 V,对四级级联的25 MW的变频器,将低电压穿越的保护定值设定为85%即8 500 V,根据不同的使用裕量,采用不同的保护定值,及早闭锁输出。

②对短时的过流故障进行复位,进行变频器重启。

由于变频器的额定容量裕量较小或者控制器运算能力有限,不能通过提升检测算法提早进入低电压穿越状态,则需要对过电流故障进行复位,允许一定程度的过电流。

TMEIC变频器由于额定容量裕量较小,当电压跌落速率较快(认为电压跌落的速率超过0.5%/ms),检测算法的升级并不能防止变频器发生过电流,并且变频器在1.2倍的过载时可以持续1 min运行,每隔10 min可重复1次,认为自身的设备可以容许极端时间的过流,因此通过图3的实现方式实现低电压穿越。

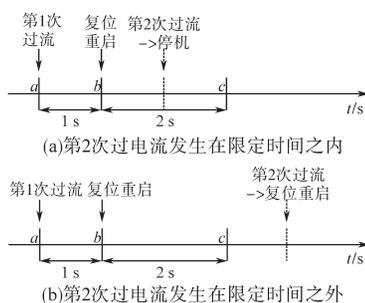


图3 TMEIC变频器低电压穿越实现方式

Fig.3 TMEIC converter LVRT realization mode

如图3,变频器在a时刻发生过电流故障,变频器1 s内复位重启(b时刻),如果在bc时刻之内(2 s)发生第2次过电流,则停机,在bc时刻之外,则再次复位重启。

这2种实现方式需要根据现场所用变频器的额定容量、检测运算能力等进行综合选择,方式

②可能产生不可逆的硬件损伤,因此严格要求了允许过流的时间。

2.1.2 变频器恢复正常运行时的过电流

现在的同步电机均采用无速度传感器的矢量控制,变频器闭锁输出进入低电压穿越状态后,为了实时对转子角度进行定位,励磁机的励磁电流保持连续输出。当网侧电压恢复后,变频器开始旋转再启动,由图4同步发电机的V形曲线可知,此时在机组当前转速下,同步电机励磁电流,变频器输出电机电枢电流需要同步,使功率因数接近1,欠励磁(功率因数超前)或者过励磁(功率因数滞后)均会引起变频器输出电流的过流,导致低电压穿越失败。励磁控制器电流变化的响应时间也影响了变频器旋转再启动的时间长度。

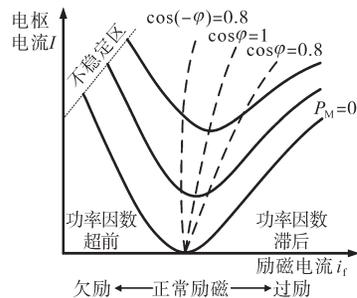


图4 同步发电机的V形曲线

Fig.4 V-shaped curves of synchronous generator

现在的无速度传感器的矢量控制算法均为PI控制器控制输出,为了避免励磁电流不同步造成过电流,需要各现场在机组各转速工况下对变频器进行测试,选择合适的PI控制参数,以避免产生此类过电流。

为了加快励磁电流的响应时间,变频器闭锁输出进入低电压穿越状态的同时,并不直接将给定励磁电流降为0,而是将给定励磁电流降为空载励磁电流,这样在电压恢复时,减少给定励磁电流与实际励磁电流的偏差,及早恢复转矩输出,同时,还有2.2节中的其他作用。

2.2 变频器直流母线电压保护

当网侧电压跌落时间过长,直流部分用于滤波的电容储能放电时间过长,会引起直流母联电压下降过大。在网侧电压恢复时,会造成直流母联电压陡升,对变压器及变频器产生冲击,引起变频器保护停机,其表现为输入电流的过流。

因此,在实现低电压穿越的实施方案过程中,保持励磁电流持续输出,一方面维持旋转磁

场,可以对电机转子实时定位,另一方面可以将同步电机变为发电机,对直流部分滤波电容进行反向充电,维持直流母联电压在合理范围内,防止网侧电压恢复瞬间产生冲击,引起输入过流,保护变压器及变频器。

2.3 变频器的其他保护

低电压穿越实现过程中,失败的最大原因是过电流故障,除此以外,不同厂家由于设计理念的不同,存在其他保护参数(如转差率保护)。当机组正常运行时,机组转速长时间不能达到机组控制输出转速时,引起转差率保护,变频器控制系统判断变频器存在故障,执行停机命令,造成机组停机。机组进入低电压穿越后,闭锁输出后转速下降,而恢复期间转速并不能立即达到控制系统输出转速,有可能造成转差率保护,一方面可以延长转差率检测的时间;另一方面,可以降低转差率报警级别,由保护停机降为显示报警信息,可以解决此项保护停机问题。

对于不同厂家的变频器,其他辅助保护功能有所不同,综合分析对机组的影响,通过更改保护定值、增加延时、改变报警级别可以进行处理。

表2是对使用较广的TMEIC与荣信2个厂家的低电压穿越的主要内容进行比较。

表2 低电压穿越方式比较

Tab.2 Comparison of low voltage ride through methods

内容	TMEIC	荣信
电压跌落检测	额定容量裕量较小,不升级检测方案,对过流故障进行复位	额定容量裕量较高,通过提升检测方案,避免产生过流,过流时停机
进入低电压穿越状态	闭锁输出	闭锁输出
恢复运行	现场测试,调整PI参数	现场测试,调整PI参数
励磁电流	维持励磁电流为空载励磁电流,保持转子实时定位	维持励磁电流为空载励磁电流,保持转子实时定位
直流欠压	触发故障停机	触发停机。闭锁输出较早,直流电压降较小
其他保护	无	转差率保护,增加延时

3 低电压穿越功能的测试与检查

3.1 低电压穿越功能的测试

对于设计有低电压穿越功能或者改造后可以实现低电压穿越功能的变频器,通常可以采用在网侧电压检测回路中安装开关器件,中断网侧

电压检测,模拟单相、两相、三相网侧电压的跌落,中断时间的长短可控,以测试不同电压跌落时间下变频器的低电压穿越功能,并对控制参数进行优化。TMEIC变频器在网侧电压检测回路(锁相环控制回路)中安装了开关对低电压穿越功能进行测试。

但是,真实电压跌落过程中,存在电压有效值检测的滞后,在闭锁输出前引起的过流一般很难进行模拟测试。如果需要测试,则需要10 kV母联进行操作,操作过程中可能会对电气设备产生冲击,并且有可能造成辅助设备停止运行,引起机组停机。这些功能的测试与完善建议在生产运行过程中针对具体的低电压穿越失败原因进行分析,并对变频器进行改进。

3.2 低电压穿越功能的检查

通常变频器仅对故障停机时的各电气参数进行录波,对于已经实现低电压穿越功能的部分厂家变频器不能从变频器的故障录波上进行验证,可以通过在变频器录波功能上进行升级,增加录波的触发方式,否则需要通过对变频器上级的电能质量监测系统的定值触发录波进行检查分析,以检查是否发生电压跌落。同时通过压缩机组的在线监测系统对机组转速变化曲线进行分析验证,检查机组是否成功进行了低电压穿越功能。图5为某压缩机低电压穿越过程的转速变化情况,转速曲线呈现出先快速下降,后缓慢上升的形态。

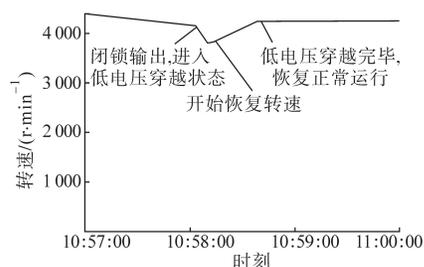


图5 低电压穿越过程的转速变化曲线

Fig.5 Speed variation curve during LVRT process

4 结论

大功率变频器低电压穿越功能的实现主要依靠控制程序的升级改造,成本相对较低,但是却可以极大地提高机组的运行稳定性。目前TMEIC变频器驱动系统和荣信变频器进行了相关的优化改造,可靠性均得到了较大提升。本文对变频器低电压穿越实际中产生的问题进行分

析,结论如下:

- 1)分析了变频器低电压穿越实施过程中可能产生的过电流原因;
- 2)给出低电压穿越中不同问题的解决方法;
- 3)分析了低电压穿越功能的测试方法,并分析低电压穿越的记录。

在实际运行过程中,可能有不同的原因造成变频器低电压穿越的失败,需要不断分析原因,进一步提升变频器低电压穿越的性能。

参考文献

[1] 刘建臣.天然气管道压气站的技术现状及发展[J].油气储运,2008,27(8):49-53.
 [2] 林森,董昭暘,康焯,等.西气东输二线电驱压缩机组驱动方式比选[J].油气储运,2012,31(6):470-472,486-487.
 [3] 卢鹏飞.管道离心压缩机的两种驱动机(工业燃气轮机和变速电动机)方案的比较[J].天然气与石油,2003,21(4):42-45.
 [4] 卢鹏飞.天然气管道离心压缩机组——各种驱动机选择[J].天然气与石油,2009,27(4):1-4,63.
 [5] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(2):1-8
 [6] Q/GDW1392—2015 风电场接入电网技术规定[S].北京:中

国电力出版社,2016.
 [7] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S].北京:中国标准出版社,2012.
 [8] 张岩.低电压穿越系统[J].油气田地面工程,2014,33(8):88-89.
 [9] 赵岩,胡学浩.分布式发电对配电网电压暂降的影响[J].电网技术,2008,32(14):5-9,18.
 [10] 刘耀中,马永岗,王国庆,等.火电厂辅机变频器低电压穿越电源的设计[J].电力电子技术,2014,48(11):13-15.
 [11] 王晓宇,张涛,刘树,等.火电厂辅机变频器低电压穿越电源[J].电力自动化设备,2015,35(5):152-159.
 [12] 张彦凯,智勇,拜润卿,等.火电厂辅机变频器低电压穿越能力的研究[J].电气传动,2014,44(11):55-58.
 [13] 吴斌.大功率变频器及交流传动[M].北京:机械工业出版社,2015:95-144.
 [14] 吴健锋.通用变频器在电网故障情况下的重启动控制探讨[C]//中国电工技术学会第八届全国电技术节能学术会议论文集,2006.
 [15] 姜宏丽.级联型高压变频器的矢量控制及低电压穿越技术研究[D].北京:华北电力大学,2015.
 [16] Stephen D Umans.电机学[M].第七版.北京:电子工业出版社,2014.

收稿日期:2019-01-21

修改稿日期:2019-04-03

(上接第 105 页)

为试验装备的健康保驾护航。

参考文献

[1] 杨述明,邱静,刘冠军.面向装备健康管理的检测参数选择与健康评估方法研究[J].中国机械工程,2012,23(13):1513-1517.
 [2] 李丹岚.基于点检的设备健康管理方法及软件工具研究[D].长沙:中南大学,2013.
 [3] 刘亚伟,李爱英,刘晓东,等.基于J2EE的炼铁厂物料跟踪系统设计与实现[J].电气传动,2016,46(1):74-76,80.
 [4] 刘志蕾,陈艳花,冯志亮,等.基于TCP/IP协议的测控系统的开发[J].计算机测量与控制,2015,23(10):3418-3420,

3429.
 [5] 黄建龙,刘明哲,王华.液压综合试验台及其监控系统的研究[J].液压与气动,2007(10):10-12.
 [6] 周磊,朱子环,耿卫国,等.美国液体火箭发动机试验中健康管理技术研究进展[J].导弹与航天运载技术,2013(5):20-25.
 [7] 刘波,李睿,付海.数控设备故障预测和健康管理的维修保障系统分析[J].现代制造技术与装备,2017(12):166-168.
 [8] 杨霏.设备健康管理系统软件的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2016.

收稿日期:2019-03-08

修改稿日期:2019-06-28