

引用格式:谭勇. 孤岛电网大功率电机启动案例分析与优化策略[J]. 有色设备, 2024, 38(2): 65-70.

TAN Yong. Case analysis and optimization strategy for high-power motor starting in island power grid[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(2): 65-70.

# 孤岛电网大功率电机启动案例分析与优化策略

谭勇

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 大功率电机连接到孤岛电网,一般会采用软启动、变频器等,以提高电机的起动性能和供电的稳定性,同时设置无功补偿装置,以提高供电系统的功率因数和降低线路损耗。但如果软启动或变频器等选型不当,或者无功补偿配置不合理,可能会出现电压波动、功率振荡、供电质量下降,甚至引发安全等问题。本文以某供水泵站的供电系统为研究对象,首先介绍了泵站的供电系统,接着对泵站试车过程中出现的电气故障进行分析,然后对孤岛电网中大功率电机启动方案的优化及无功补偿装置的设置进行探讨,接着根据项目实际情况,提出将固态软启动器与实时无功补偿系统进行有机结合,采用合适容量的实时无功补偿系统,可降低大电机的启动电流和电网压降,较好地解决孤岛电站配电系统中大功率电动机启动期间电能质量差的问题,同时也对现有泵站供电系统提出几个备选方案供参考,最后给出几点建议。

**[关键词]** 孤岛电网; 大功率电机启动; 实时无功补偿; 供水泵站; 矿山工程; 供电系统; 电气故障

**[中图分类号]** TD63

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2024)02-0065-06

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.02.011

## 0 引言

孤岛电网是指远离大电网供电,由独立电源和用户设备共同构成的电力网络。孤岛电网的容量一般较小,因此对供电的稳定性和可靠性要求较高。大功率电机连接到孤岛电网,一般会采用软启动、变频器等,以提高电机的起动性能和供电的稳定性,同时设置无功补偿装置,以提高供电系统的功率因数和降低线路损耗<sup>[1-2]</sup>。但如果软启动或变频器等选型不当,或者无功补偿配置不合理,也可能出现如下问题。①电压波动:大功率电机采用软启动后,为克服负载的起动转矩,电机启动电流变化还是比较大,会引起电网大的电压波动。如果电压波动过大,可能会影响其他电器的正常使用<sup>[3-4]</sup>。②功率振荡:大功率电机在电机启动期间需要从电网吸收大量无功,会引起发电机系统的功率剧烈振荡,有可能导致发电机停机或者部分区域停电。③其他:无功

补偿装置可以提高供电系统的功率因数,如果不匹配或设置不当,同样会导致供电质量下降,甚至引发安全问题<sup>[5-6]</sup>。

本文以某供水泵站的供电系统为例,对孤岛电网供电的大功率电机启动方案优化及无功补偿装置如何设置等问题进行了探讨。

## 1 泵站供电系统概述

某矿山工程在水源地新建一供水泵站。站内设5台0.66 kV、560 kW的深井水泵(4用1备)和若干小功率潜污泵,深井水泵置于吸水池上,从吸水池吸水并加压,经输水管道送至矿山高位水池,再由高位水池给全矿供水。

在距水源地供水泵站约10 km处设有矿山自建燃油发电站1座,站内有6台10.5 kV、3 740 kW的燃油发电机组(其中4台工作,1台备用,1台检修),电站的10 kV侧未设置无功补偿装置。从矿山电站引出多回10 kV线路放射式给水源地供水泵站和其他区域供电,其中水源地供水泵站采用双回LGJ-240的10 kV架空线路供电,水源地供水泵站内设10 kV配电站和2台10/0.66 kV、2 000 kVA的变压器。每台560 kW水泵均配置1台固态软启动

**[收稿日期]** 2023-12-16

**[作者简介]** 谭勇(1976—),男,湖南涟源人,高级工程师,硕士,主要研究方向为有色金属冶炼工程电气与控制系统的研究与设计。

器,每台 10/0.66 kV 变压器的低压出口设有 1 套采用接触器投切,容量为 300 kvar,电抗率为 7% 的自动无功补偿装置,泵站一次主接线图具体如图 1

所示。

560 kW 水泵电机选用高效 660 V 电机,参数见表 1。

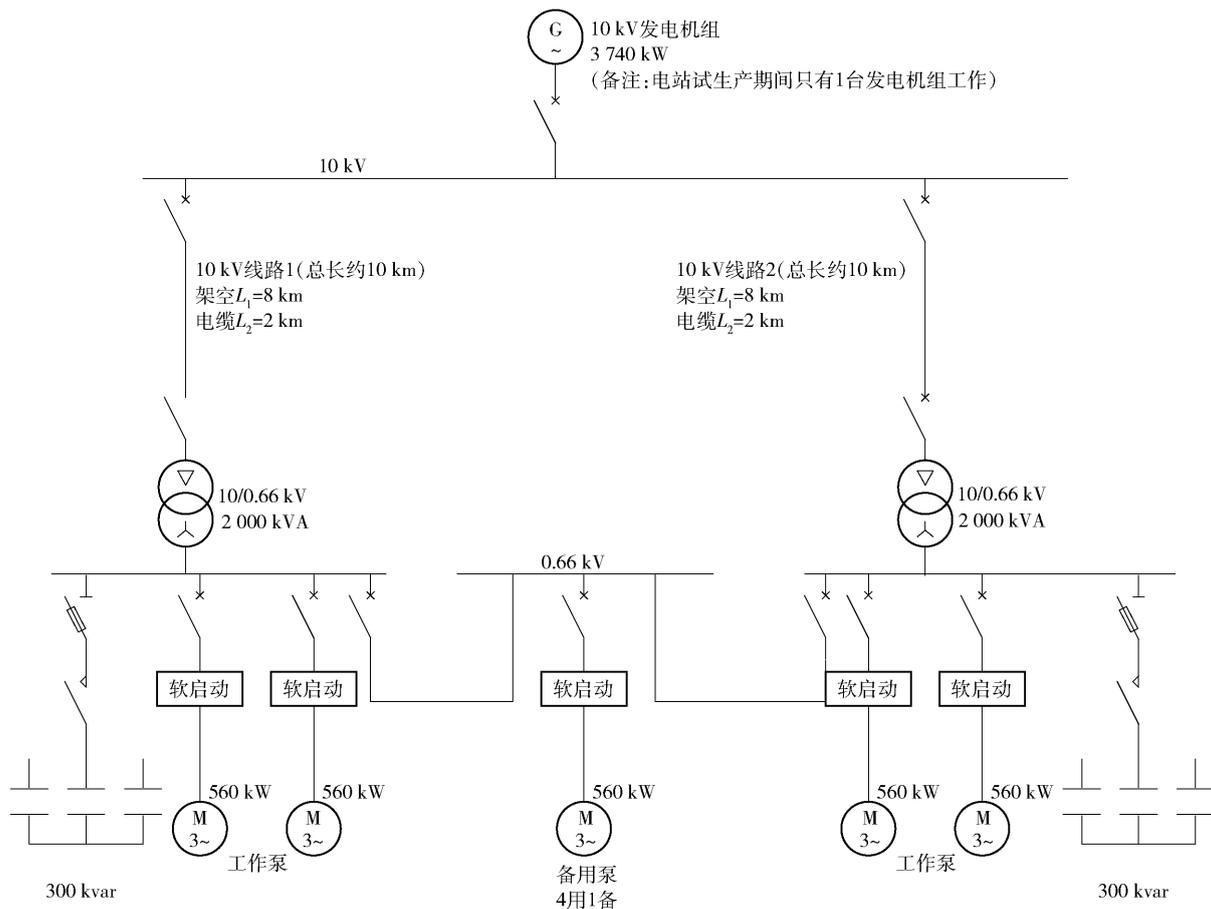


图 1 泵站一次主接线示意图

Fig.1 Primary system diagram of pump station

表 1 560 kW 水泵电机参数

Table 1 560 kW water pump motor parameters

参数	额定功率/ kW	额定电压/ V	额定电流/ A	额定转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	额定效率/ %	额定功率 因数/ ( $\cos\varphi$ )	最大转矩/ 额定转矩 $T_{max}/T_n$	堵转转矩/ 额定转矩 $T_{st}/T_n$	堵转电流/ 额定电流 $I_{st}/I_n$
数值	560	660	565	1 485	93.7	0.92	1.8	1.0	7.0

## 2 泵站电气故障描述

矿山从开采到达产持续时间 2 年,在此期间一直由 1 台 10.5 kV、3 740 kW 的燃油发电机组给矿山供电,用电负荷主要为供水泵站,现场试车按 2 种情况进行。

1) 未投入无功补偿装置。采用 4.0I<sub>e</sub> 的电流逐台启动大功率电机,发现电机启动时间过长,电机有

些发热;越往后电机的启动越困难,最后的电机无法启动。随后尝试调整软启动装置的工作模式,设定软启动装置在斜坡电流模式下工作,在满足启动转矩的前提下,初始电流值设为 1.7 I<sub>e</sub>、上升时间设为 4 s、极限电流值设为 4.0 I<sub>e</sub>,结果在大电机启动期间,供水泵站的电压波动幅度高达 -20%,同时上一级电站的发电机组出现了大的无功功率波动。

2) 投入无功补偿装置。为减少供水泵站的电

压跌落和上级电站的冲击,尝试在泵站投入无功补偿装置。然而,在大电机启动初期,无功补偿电容器投切时发出声响,补偿控制器显示功率因数偏低(0.24)。几秒后,电容柜内突发爆裂声,现场人员立即停机并切断变压器出线断路器。检查发现,1只电容接线端子爆裂,其余2~3只电容的接线端子出现轻微损坏。

### 3 泵站电气故障分析

1)未投入无功补偿装置时,采用 $4.0 I_e$ 的电流启动电机,随着电动机运行台数的增加,配电系统的总电流越来越大,因此线路电压降越来越大,导致后启动的电机无法启动。软启动在启动期间所需无功功率较大,即无功电流较大,致使供水泵站的电压波动幅度高达-20%。

2)投入无功补偿装置时,电容器损坏的原因有很多种,如通风不良、环境温度过高、运行电压过高、谐波分量过大、电容器质量问题、操作过电压、运行维护不当等。电容器故障发生在大电机启动初期,原因分析如下:①由于电动机选用的固态软启动器采用三相反并联的晶闸管实现交流调压,且晶闸管是典型的非线性器件,在工作过程中会产生谐波,在大电机启动之初软启动器处于深度调压阶段,因此产生的谐波较大,由谐波引起的过电压和过电流会大幅增加电容器的损耗和过热<sup>[7]</sup>,这是电容器损坏的原因之一;②泵站选用的电容补偿装置采取接触器的投切方式,此种装置仅适用于负载变化不大、无功功率较稳定而不需频繁投切补偿电容器的供电系统,当应用在负载无功功率快速变化的场合,由于接触器动作的延缓(一般需要数十秒),很难动态跟踪无功功率变化,且不能做到零电流投切电容器,这样在投切电容器时会产生很大的合闸涌流和过电压<sup>[8]</sup>,因此会发生投切振荡烧坏接触器触头的现象。

因此,接触器投切方式的无功补偿装置不适合采用固态软启动装置的电机。在电机启动过程中,由于无功功率较大且迅速变化,加之谐波电流的影响,电容器不能正常投切而损坏,即此情况下电能质量不但不能提高,还会对供电系统造成破坏。

3)无功补偿装置设置分析。由于每台水泵电机的自然功率因数为0.92,另外矿山电站到供水泵站长距离供电线路的对地电容效应还能提供部分无

功补偿,因此供水泵站在正常运行时可不需要无功补偿。鉴于电机启动时功率因数较低,对电机启动不利,仍设置了无功补偿装置。

供水泵站的大电动机采用了固态软启动装置,在电动机启动时功率因数较低,配电系统中的无功电流较大,较大的无功电流经过长距离输电线路后产生明显的电压降落,造成供水泵站大电机在启动瞬间的电压波动幅度高达-20%,超过了《电能质量 供电电压允许偏差》(GB/T 12325—2003)中规定的10 kV及以下三相供电电压在电机不频繁启动条件下配电母线电压不应低于额定电压的85%<sup>[9]</sup>,因此增设无功补偿装置可减少启动时的无功电流,从而降低电机启动时的电压降。

对于有限容量的电网,电动机启动引起的电网电压波动为电动机启动时总无功功率波动量占母线短路容量的百分数。电压偏差计算见式(1)。

$$\Delta U\% = \Delta Q / S_{\min} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta U\%$ 为电压偏差的百分比,也可理解为需要提升或恢复的电压比例, $\Delta U\% = (\Delta U / U) \times 100\%$ , $\Delta U$ 为电压降; $U$ 为母线电压; $\Delta Q$ 为电动机启动时回路无功功率的波动量,Mvar; $S_{\min}$ 为母线最小短路容量,MVA。

式(1)的具体推导如下。由基本的线路电压损失公式(2)可见,当线路中消耗的无功功率 $Q$ 减少,母线的电压降 $\Delta U$ 相应减少。通常可以忽略10 kV线路上的电阻,低压线路由于线路截面粗且距离短也可忽略线路上的电阻,因此可近似按电机启动时所引起的母线电压降选择电容器容量,补偿电容器 $\Delta Q$ 的近似公式见式(3)。

$$\Delta U = [(P \times R + Q \times X) / U] \quad (2)$$

$$\Delta Q = \Delta U \times U / X \quad (3)$$

式中: $X$ 为从电源到负载侧母线的线路总阻抗, $\Omega$ ; $U$ 为负载侧母线电压,kV; $P$ 为从电源到负载侧母线传输的有功功率,MW; $R$ 为从电源到负载侧母线的电阻, $\Omega$ ; $Q$ 为从电源到负载侧母线传输的无功功率,Mvar。

将 $X$ 的近似公式(4)代入式(3),整理后即可得到式(1)。

$$X = (U \times U) / S_{\min} \quad (4)$$

由式(1)可看出: $\Delta U\% \propto \Delta Q$ 。

通过降低 $\Delta Q$ ,即减少电动机启动时从电网吸收的无功功率,并转而由就地补偿装置提供大部分

所需的无功功率,可以有效按比例降低泵站的电压降。

以上得出,通过在供水泵站设置快速投切方式的无功补偿装置,可实现电动机起动时无功功率就地平衡,减小电动机的起动电流,从而提高供水泵站的电压。

#### 4 电机起动方案分析

针对本文所介绍的供水泵站,鉴于配电系统已构建完成且电气设备处于调试阶段,为最小化改动并解决问题,经分析可采取以下措施。

1) 调度备用机组。矿山电站属于孤岛电站,电网容量较小,抗冲击负荷能力较差。虽然电站有备用机组,可以通过调度备用机组来提高电站抗冲击负载的能力,减少供电系统的阻抗,如起动大功率电机前,提前开启1台备用机组,与系统并列运行,提高系统的无功储备,待大电机起动完成后,再将备用机组解列,但是上述操作步骤复杂,调度容易出错,且频繁短时冲击对发电机组不利。因此,尽管备用机组理论上可行,实际操作中需权衡利弊,谨慎使用。

2) 改造泵站的无功补偿装置。改变无功补偿装置的投切方式,将原接触器投切方式改为晶闸管快速投切方式,这样软启动与晶闸管快速投切方式的无功补偿装置相结合,软启动器在满足起动转矩的前提下尽量减小起动电流值,快速投切方式的无功补偿装置可实现电动机起动时无功功率就地平衡,这样就可满足起动转矩的前提下,降低电动机的起动电流,从而减少电机的起动压降,解决电机的起动问题,保证供水泵站电机能进入正常运行状态。

经过多方考查和比较,选用能进行分相补偿的实时补偿系统。该系统采用无触点晶闸管电子开关及过零检测和投切技术,可确保5~20ms内快速投切全部电容器组,并可有效减少由谐波引起的过电压和过电流对电容器的损耗和过热影响;能克服浪涌冲击电流,可确保电容器平均统计寿命长达10年。该实时补偿系统的技术和性能领先于“准实时动态补偿柜”,有如下优点:不会增加电压、电流的谐波水平;能在短时间内提供电机起动时所需要的无功能量,防止电网电压的过度跌落;可降低电机起动时间,减少电机不必要的磨损<sup>[10-12]</sup>。

图2为采用晶闸管投切的实时补偿系统中1组电容器的主电路图。图3为使用的实时补偿系

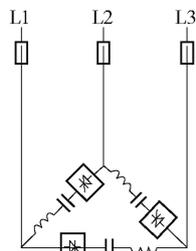


图2 实时补偿系统晶闸管投切一组电容器的主电路图  
Fig.2 Main circuit diagram of real-time compensation system thyristor switching a group of capacitors

统,5~20ms投切全部电容器组,快速跟踪负载变化,起到稳定电压、减少跌落,消除闪变的作用。

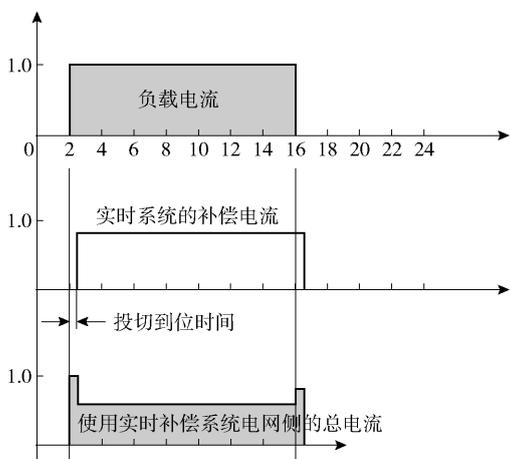


图3 使用的实时补偿系统

Fig.3 Using a real-time compensation system

图4为使用的准实时补偿系统。投入时电容逐步投入,造成欠补,断开时电容器逐步切除,造成过补,使得系统电压、电流抬高,危害设备安全。

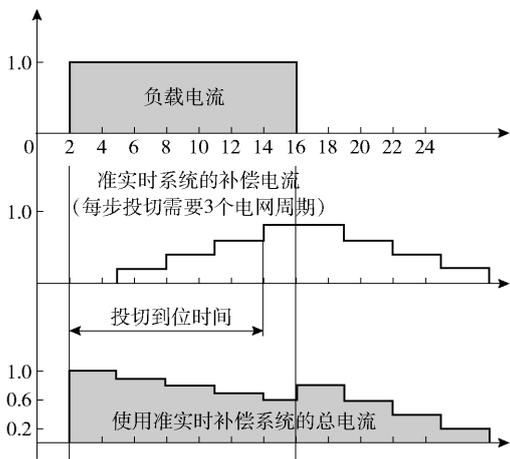


图4 使用的准实时补偿系统

Fig.4 Using a quasi real-time compensation system

表2为某6 kV的电网,额定功率1 000 kW的AC660V电机接在AC6/0.66 kV,容量为4 000 kVA的变压器上,使用直接起动、软启动器、全补偿、软启

动器+80%补偿、50%补偿、软启动器+50%补偿的试验结果。

表2 AC660V 1 000 kW电机各种启动方案的试验结果

Table 2 Experimental results of various starting schemes for AC660V 1 000 kW motor

参数	直接起动	软启动	全补偿	软启动+80%补偿	50%补偿	软启动+50%补偿
起动时间/s	7	13.5	5	10.3	6	11
电压跌落/%	-16	-10	1.5	0.1	-9	-4.5
起动电流	$7 \times I_{nom}$	$4.2 \times I_{nom}$	$3.8 \times I_{nom}$	$1.75 \times I_{nom}$	$4.7 \times I_{nom}$	$2.5 \times I_{nom}$
电压THD/%	4	10	1	2	1	4
电流THD/%	1	13.5	3	13.5	2	15

从表2看出,软启动+80%补偿是比较经济的方案,在应对弱电网起动大电机时,可得到很高的性价比,故推荐选用。

对应本项目,其660 V、560 kW电机采用软启动后电机启动期间的 $\Delta Q$ 约为2 Mvar,泵站0.66 kV侧母线 $S_{min}$ 约为12 MVA,此处 $S_{min}$ 是指在只有1台AC10.5 kV、3 740 kW发电机组给矿山供电,经过10 km的10 kV输电线路和2 000 kVA配电变压器降压后,估算出泵站0.66 kV侧母线处的短路容量,代入公式(1)可得 $\Delta U\%$ 约为16%,即电机采用软启动+全补偿方案后(即接入容量为2 Mvar的实时无功补偿)泵站0.66 kV母线上在电机软启动期间可减少约16%的电压降。若采用软启动+80%补偿方案(即接入容量为1.6 Mvar的实时无功补偿)后,泵站0.66 kV母线上在电机软启动期间可减少约13%的电压降。

在供水泵站就地设置AC660V、1.6 Mvar的实时无功补偿系统后,大功率水泵启动时的电能质量将得到显著改善。具体而言,矿山电站仅需提供少量无功支持,泵站的网侧电流将降低,各级配电母线电压均可达标。此方法不仅能缩短水泵启动时间,还能有效解决电机启动期间的发热问题,从而优化泵站的运行效率与稳定性。

## 5 泵站供电系统的其他优化方案

1)方案1:取消软启动器,5台水泵每台均配有1台变频器,根据高位水池的液位反馈信号,通过PID运算自动调整变频器输出频率,改变电动机转速,达到恒压供水的目的。只有1个闭环回路,控制

较简单,但成本高,还需要加设大容量的有源滤波装置对变频器产生的谐波进行治理。

2)方案2:取消软启动器,5台水泵共用1台变频器,通过切换变频器来起停不同的水泵。性能与方案1差不多,成本低,但控制程序较复杂,操作维护困难。

3)方案3:将泵站内的2台水泵改为变频调速,其他泵继续采用软启动器起动,根据供水量要求通过采取调节水泵运行台数(粗调)和变频调速(细调)的方式,可使供水系统的运行平稳可靠,减少水泵的起动次数,延长泵和电机的使用寿命,消除起动和停机时的水锤效应,达到节能和降低成本的目的。

4)方案4:软启动和实时无功补偿系统相结合,电机起时无功功率就地平衡,降低起动电流和电压降,虽然控制较简单但供水水压难以控制平稳,且电机起动和停机时供水管路会受水锤效应冲击且不节约电能。

## 6 结论与建议

提高孤岛电网的供电可靠性和电能质量是一个系统工程,需要从发输电、供配电等各个环节上进行综合考虑。

1)采用变频器或变频软启动器:在孤岛电网中,对于大功率电动机的启动,最佳方案是采用变频器或变频软启动器。这不仅解决了启动时可能出现的问题,还能节约电能。此外,变频器的软起停功能还有助于减少水锤效应对供水管路造成的冲击。

2)结合固态软启动器与实时无功补偿系统:通过将固态软启动器与实时无功补偿系统进行有机结合,可以在找到平衡点后降低大电机的起动电流和

电网压降。这种方法能有效解决孤岛电站配电系统中大功率电动机启动期间电能质量差的问题,从而提高供电可靠性和电能质量。

3)多台泵并联运行采用多种调节方式:对于多台泵并联运行的供水系统,可采用泵的运行台数调节(粗调)和变频调速调节(细调)的方式。这样的组合可以使供水系统的运行更加平稳可靠,并且能够减少水泵的启动次数,从而降低能耗和设备磨损。

#### [参考文献]

- [1] 郭永元. 配网供电可靠性分析[J]. 中国新技术新产品,2011(3):182.
- [2] 郑宗安. 提高供电可靠性的探讨[J]. 中国电力,2002,35(4):32-34.
- [3] 张红启. 软起动的介绍及应用[J]. 当代化工,2014(6):969-972.
- [4] 杨楠. 大功率电动机软启动方案的优化[J]. 电子世界,

2016(11):78-79.

- [5] 朱建军,卢志刚. 中低压配电网的无功补偿[J]. 电力电容器与无功补偿,2011,32(4):19-23.
- [6] 雷霆,刘现军,张智宝,等. 城市轨道交通主变电所无功补偿策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(4):21-26.
- [7] 陆安定. 功率因数与无功补偿[M]. 上海:上海科学普及出版社,2004.
- [8] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [9] GB/T 12325—2003,电能质量供电电压允许偏差[S].
- [10] 左双杰. 探讨离心泵流量与电机电流的关联作用[J]. 有色矿冶,2022,38(2):46-49.
- [11] 张勇军,刘辰伟,肖雄,等. 轧机高性能电气传动技术发展与应用[J]. 冶金自动化,2023,47(2):107-116.
- [12] 陈志强,赵强,张雷,等. 永磁同步电动机在地面生产系统应用的节能效果分析[J]. 露天采矿技术,2023,38(2):103-105.

## Case analysis and optimization strategy for high-power motor starting in island power grid

TAN Yong

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** When high-power motors are connected to an isolated power grid, soft starting, frequency converters, etc. are generally used to improve the starting performance of the motor and the stability of the power supply. At the same time, reactive power compensation devices are installed to improve the power factor of the power supply system and reduce line losses. However, if the selection of soft start or frequency converter is improper, or the reactive power compensation configuration is unreasonable, voltage fluctuations, power oscillations and power supply quality decreased, and even safety issues may occur. The article takes the power supply system of a certain water supply pumping station as the research object. Firstly, the power supply system of the pumping station is introduced, followed by an analysis of the electrical faults that occurred during the commissioning process of the pumping station. Then, the optimization of the high-power motor starting scheme and the setting of the reactive power compensation device in the isolated power grid are discussed. Based on the actual situation of the project, it is proposed to organically combine the solid-state soft starter with the real-time reactive power compensation system. The use of a suitable capacity real-time reactive power compensation system can reduce the starting current of the high-power motor and the voltage drop of the power grid, which can effectively solve the problem of poor power quality during the startup of the high-power motor in the distribution system of the isolated power station. At the same time, several alternative solutions for the power supply system of the pumping station are also proposed for reference. Finally, several suggestions are given.

**Key words:** islanded power grid; high power motor starting; real-time reactive power compensation; pumping station; mining engineering; power supply system; electrical fault

