

# 地铁长大隧道内大功率风机起动对变压器容量选择的影响分析

李汉伟

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//高级工程师)

**摘要** 部分地铁隧道的长大区间配备了容量较大的风机, 为这些风机配电设置的变压器容量应在保证风机能够正常起动的条件下, 达到节约投资和运行费用的目的。依据实际案例, 从相关规范和手册入手, 通过数据反推验算, 得到如下结论: 当预接负荷功率小于变压器容量的 25% 且变压器容量与风机功率之间的最小比值为 2.5 时, 风机可正常起动且变压器容量最小, 此比值已得到现场实测验证。同时, 针对此情况下按手册给定的保护整定计算公式得到的计算结果不能满足风机起动电流峰值要求的问题, 提出采取降低灵敏度来提高整定值的方法, 以避免起动过程中变压器高压侧过流保护跳闸。

**关键词** 地铁隧道; 长大线路; 大功率风机; 变压器容量; 过流保护整定值

**中图分类号** U453.5

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2022.03.038

## Influence of High-power Fan Start-up on Transformer Capacity Selection in Metro Long Tunnel

LI Hanwei

**Abstract** Some metro tunnel long intervals are equipped with large capacity fans. The transformer capacity set for power distribution of these fans should save investment and operation cost under the premises of ensuring normal start-up. On the basis of actual case, starting with relevant specifications and manuals, through data reverse calculation for verification, the following conclusions are obtained: when the pre-connected load power is less than 25% of the transformer capacity and the minimum ratio between the transformer capacity and the fan power is 2.5, the fan can start normally and the transformer capacity is the minimum. This ratio has been verified by field measurement. While in this scenario, the results calculated from the protection setting calculation formula given in the manual cannot meet the requirements of the peak starting current of the fan. It is proposed to reduce sensitivity to increase the setting value so that overcurrent protection tripping at the

high voltage side of the transformer is avoided during starting process.

**Key words** metro tunnel; long line; high-power fan; transformer capacity; over current protection setting value

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

在地铁建设中时常会遇到一些长度超过 3 km 甚至 5 km 的长大隧道, 部分地铁线路还有跨越江河、湖泊或海洋的长大隧道。为满足隧道内空气质量及排烟的需求, 这些长大隧道中都设有功率较大的风机, 其单机功率一般超过 100 kW, 部分单机的功率甚至超过 200 kW, 而隧道内的其他用电负荷容量相对较小。为这些风机配电而设置的变压器, 其容量的选择需考虑风机起动电流的影响。变压器容量选择过小, 在风机起动时, 可能会因断路器保护频繁跳闸造成风机起动失败, 或因变压器严重过载造成线圈永久性损伤。但是, 变压器容量也不宜太大, 否则会造成投资浪费和损耗增加, 并给设备的运输、安装带来一定的困难<sup>[1]</sup>。

对一个已确定功率的风机, 在保证设备能正常起动的前提下, 其所需配备的变压器最小容量是多少, 相关的国家规范及设计手册中并无明确的说明。本文以武汉某地铁工程越江段隧道风机为例, 从规范和手册给定的已有数据, 通过计算分析, 推导出变压器容量的最小配置要求, 并对变压器的保护定值设定给出建议。

## 1 工程技术条件说明

该地铁工程越江段隧道全长约为 3.5 km, 因隧道中间段位于江底, 无法在中间位置设置风井, 故在隧道两端设置了区间风井和区间变电所。在每个风井内设 2 台 200 kW 的隧道风机, 该隧道风机为鼠笼型三相异步电机驱动, 运行方式为“一用一

备”。单台风机的额定电流为 361 A, 额定电压为 380 V, 直接启动时的最大起动电流约为额定电流的 7 倍。每台风机均设置了软起动器, 起动电流可设定为额定电流的 2~6 倍。

风井内设置了照明、水泵、空调等普通负荷, 正常运行时普通负荷的总功率在 30 kW 以内, 单体设备的功率均小于 10 kW, 功率因数为 0.8。

区间风井和区间变电所合设, 区间变电所内设置 2 台容量相同的变压器, 低压母线采用单母线分段运行, 并设置母联断路器。正常运行时, 2 台隧道风机分别接在 2 段母线上, 2 台隧道风机不同时运行。变压器一次侧额定电压为 35 kV, 一次侧最小运行方式的短路容量为 100 MVA, 变压器阻抗电压为 6%。变电所至隧道风机的最远距离约为 185 m, 其连接电缆截面为  $2 \times (3 \times 185 + 1 \times 95) \text{ mm}^2$ 。

## 2 规范及手册相关要求

GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》有如下要求。

1) “2.2.2 交流电动机起动时, 配电母线上的电压应符合下列规定: ①配电母线上接有照明或其他对电压波动较敏感的负荷, 电动机频繁起动时, 不宜低于额定电压的 90%; 电动机不频繁起动时, 不宜低于额定电压的 85%。②配电母线上未接照明或其他对电压波动较敏感的负荷, 不应低于额定电压的 80%。③配电母线上未接其他用电设备时, 可按保证电动机起动转矩的条件决定; 对于低压电动机, 尚应保证接触器线圈的电压不低于释放电压。”

2) “2.2.3-2 当不符合全压起动的条件时, 电动机宜降压起动, 或选用其他适当的起动方式。”

GB 51348—2019《民用建筑电气设计标准》第 9.2.5 条也有类似的描述。

在《钢铁企业电力设计手册》(下册)中, 关于全压起动的笼型电动机功率的要求为: 经常起动时, 不大于变压器额定容量的 20%; 不经常起动时, 不大于变压器额定容量的 30%。但在实际设计中, 如果变压器只带 1 台电机且其他负荷较小, 按电机功率不大于变压器额定容量的 30% 考虑时, 则所选择的变压器容量会偏大。

如何根据已确定的风机(或电机)功率来选择变压器的最小容量, 在规范或手册中均无明确的说明, 本文将以上述条件来计算反推两者的比例关系。

## 3 变压器最小容量的确定

### 3.1 电机起动时压降的计算式

根据《工业与民用供配电设计手册》(第 4 版)及文献[2-3]中电动机起动时电压暂降的计算方法, 母线电压及电机端子电压计算公式如式(1)~(4)所示。电机起动计算电路如图 1 所示。

母线短路容量  $S_{\text{scB}}$  的计算式为:

$$S_{\text{scB}} = 1 / \left( \frac{1}{S_{\text{sc}}} + \frac{1}{S_{\text{T}}} \right) = 1 / \left( \frac{1}{S_{\text{sc}}} + \frac{u_{\text{k}}}{S_{\text{rT}}} \right) \quad (1)$$

式中:

$S_{\text{sc}}$ ——最小运行方式下系统短路容量;

$S_{\text{T}}$ ——变压器容量;

$u_{\text{k}}$ ——变压器的电抗相对值, 取阻抗电压相对值;

$S_{\text{rT}}$ ——变压器的额定容量。

起动回路计算容量  $S_{\text{st}}$  的计算式为:

$$S_{\text{st}} = 1 / \left( \frac{1}{S_{\text{stM}}} + \frac{X_{\text{l}}}{U_{\text{av}}^2} \right) \quad (2)$$

式中:

$S_{\text{stM}}$ ——电动机额定起动容量;

$X_{\text{l}}$ ——线路电抗;

$U_{\text{av}}$ ——系统平均电压。

电动机起动时, 变电所母线电压相对值  $u_{\text{stB}}$  的计算式为:

$$u_{\text{stB}} = u_{\text{s}} \frac{S_{\text{scB}}}{S_{\text{scB}} + Q_{\text{L}} + S_{\text{st}}} \quad (3)$$

式中:

$u_{\text{s}}$ ——电压母线电压相对值, 取 1.05;

$Q_{\text{L}}$ ——预接负荷无功功率。

电机端子电压相对值  $u_{\text{stM}}$  的计算式为:

$$u_{\text{stM}} = u_{\text{stB}} \frac{S_{\text{st}}}{S_{\text{stM}}} \quad (4)$$

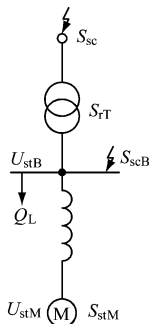


图 1 电机起动计算电路

Fig. 1 Motor start calculation circuit

3.2 采用直接起动方式时变压器最小容量计算

根据上文的工程技术条件,当隧道风机采用直接起动方式时,按配电母线电压不低于额定电压的 90% 和 85% 分别计算,得到变压器的最小容量如表 1 所示。

表 1 变压器最小计算容量计算

Tab.1 Minimum calculated capacity of transformer				
$u_{stB}$	$S_{st}/$ MVA	$Q_L/$ Mvar	$S_{rT}/$ kVA	$u_{stM}$
0.90	1.484 5	0.022 5	620.5	0.803 3
0.85	1.484 5	0.022 5	413.7	0.758 7

由表 1 可以看出,如果不考虑其他因素,仅以母线电压波动不超过规范规定的范围作为变压器容量选择的依据,则选出来的变压器容量较小。与《钢铁企业电力设计手册》(下册)所要求的全压起动的笼型电机功率在经常起动时不大于变压器额定容量的 20%、在不经常起动时不大于变压器额定容量的 30% 的要求相比,容量相差较大。

3.3 设置软起动器下变压器最小容量计算

《钢铁企业电力设计手册》(下册)中对电机起动时的最大起动电流与变压器容量的配合有如下要求:电机起动时,应对变压器过负荷进行校验,若 24 h 内起动次数在 6 次以内,每次起动持续时间不超过 15 s 且变压器的负荷率小于 90% 时,或每次起动持续时间不超过 30 s 且变压器负荷率小于 70% 时,电机的最大起动电流允许值为变压器额定电流的 4 倍;若 24 h 起动了 10~20 次(每次起动持续时间和变压器的负荷率同前),则电机的最大起动电流允许值可降低至变压器额定电流的 2~3 倍。当不符合上述条件时,应加大变压器的容量,而不应该采用进一步降低起动电压的方法,否则会延长电动机的起动时间,使变压器过热情况加剧。

本工程中风机的功率为 200 kW,采用直接起动方式时的起动时间较长。若采用软起动器方式,一般将起动电流设置为额定电流的 3~4 倍,由此将导致其起动时间更长。在最大起动电流相应为变压器额定电流的 2~3 倍计算原则的基础上进行保守估算(软起动器的起动电流设置为额定电流的 4 倍,风机起动时变压器允许的最大起动电流为变压器额定电流的 2 倍),则变压器的容量为 475 kVA。结合表 1,考虑到变压器实际的规格,选择 500 kVA 的变压器即可,此时变压器容量与风机功率之比为

2.5。

本工程现场实测结果也显示,采用 400 kVA 的变压器时,隧道风机大多数时候起动失败,而当变压器替换成 500 kVA 时,隧道风机均可以正常起动,这说明变压器容量为风机功率的 2.5 倍时,变压器容量最小,且可以满足风机正常起动要求。

4 保护定值设定

根据 GB/T 50062—2008《电力装置的继电保护和自动装置设计规范》及《工业与民用供配电设计手册》(第 4 版)的要求,城市轨道交通中的配电变压器需设置过电流保护和电流速断保护。其过电流保护的整定计算式如下:

$$I_{opk} = K_{rel} K_{con} \frac{K_{ol} I_{IrT}}{K_r n_{TA}} \tag{5}$$

$$K_{sen} = I_{2k2min}/I_{op} \tag{6}$$

$$I_{op} = \frac{I_{opk} n_{TA}}{K_{con}} \tag{7}$$

式中:

- $I_{opk}$ ——保护装置的动作电流;
- $K_{rel}$ ——可靠系数,用于过电流保护时一般取 1.2;
- $K_{con}$ ——接线系数,接于相电流时取 1,接于相电流差时取 $\sqrt{3}$ ;
- $K_{ol}$ ——过负荷系数(包括电动机自起动引起的过电流倍数),一般取 2~3,无自起动电动机时取 1.3~1.5;
- $I_{IrT}$ ——变压器高压侧额定电流;
- $K_r$ ——继电器返回系数,取 0.9;
- $n_{TA}$ ——电流互感器变比;
- $K_{sen}$ ——保护装置的灵敏系数;
- $I_{2k2min}$ ——最小运行方式下变压器低压侧两相短路时,流过高压侧(保护安装处)的稳态电流;
- $I_{op}$ ——保护装置一次动作电流。

按照《工业与民用供配电设计手册》(第 4 版)的规定, $K_{sen} \geq 1.3$ 。当隧道风机功率为 200 kW、变压器容量为 500 kVA 时,计算可得到变压器高压侧额定电流  $I_{IrT}$  为 8.25 A。由式(5)计算可得,过电流保护整定值  $I_{opk}$  为 16.50 A。

依据《工业与民用供配电设计手册》(第 4 版)表 4.3-7,最小运行方式下变压器低压侧两相短路时,流过高压侧(保护安装处)的稳态电流  $I_{2k2min}$  为 131.00 A。由式(6)计算得到  $K_{sen}$  为 7.9,大于电气

保护规定的基本值(1.3),从保护灵敏度来看可满足要求,且灵敏系数较高。但把风机起动电流(带软起动器,起动电流为额定电流的4倍)折算到高压侧,此时的变压器高压侧电流为16.50 A,即风机起动时的电流已经达到变压器高压侧过电流保护的整定值,因此在风机起动时变压器的保护可能会动作,导致风机启动中途断电而起动失败。

解决此问题所采取的改进措施为降低保护的灵敏度、提高整定值,如将 $K_{\text{sen}}$ 调整为4,则可反推出 $I_{\text{opk}}$ 为32.75 A,此时变压器过电流保护的整定值满足灵敏度要求,且远大于风机起动时的高压侧电流,保护不会误动作。

## 5 预接负荷容量分析

针对本案例,从式(3)和式(4)可以看出,预接负荷的无功功率 $Q_L$ 的大小主要影响变电所母线电压和电机端子电压。当本工程选择500 kVA的变压器时, $S_{\text{scB}}$ 为7.69 MVA, $S_{\text{st}}$ 为0.8 MVA,由式(3)可得,当 $Q_L=0$ 时, $u_{\text{stB}}=0.905u_s$ ;当 $Q_L=0.1$  MVar时, $u_{\text{stB}}=0.894u_s$ ,两者的数值差在1%左右,对系统的整体运行没有实质性影响。考虑到地铁中的负荷功率因数一般取0.8~0.9,按最低的0.8计算,当 $Q_L=0.1$  Mvar时,其有功功率为133 kW,此时预接负荷功率与变压器容量之比约为25%。

## 6 结语

经计算研究发现,对于地铁隧道中的大功率风

(上接第177页)

理的难点。随着智能化技术的发展,软件的机器学习能力将进一步提升,可利用检测得到的目标信息,不断更新学习的模板库,进一步优化判断条件,以提高自动扶梯多维感知系统判断乘客不规范乘搭行为的准确度。

## 参考文献

- [1] 涂春磊,李向东,孙民,等.基于事故与故障统计的自动扶梯风险分析[J].中国特种设备安全,2016(8):18.  
TU Chunlei, LI Xiangdong, SUN Min, et al. Risk analysis of automatic escalator based on accident and fault statistics[J]. China Special Equipment Safety, 2016(8):18.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.自动扶梯和自动人行道的制造与安装安全规范:GB 16899—2011[S].北京:中国标准出版社,2011:32.

机(水泵也一样),当为其配置的变压器的预接负荷功率小于变压器容量的25%且变压器的容量与风机功率之比不小于2.5时,即可满足风机起动的要求,该比值已得到了现场实测试验证。此时,变压器高压侧过流保护的整定值按手册公式计算的结果很可能不能满足要求,可采取降低灵敏度的方法来提高整定值,以避免风机起动过程中保护跳闸。

## 参考文献

- [1] 郭志奇.地铁越江隧道风机配电变压器容量的选择[J].都市轨道交通,2019(3):121.  
GUO Zhiqi. Selection of fan distribution transformer capacity for subway crossing river tunnel[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019(3):121.
- [2] 卞锐生.电动机启动时电压暂降计算法之考证与改进[J].建筑电气,2016(6):3.  
BIAN Kaisheng. Textual research and improvement of voltage dip calculation method at starting of electric motor[J]. Building Electricity, 2016(6):3.
- [3] 林惠仁,李丹丹,刘勇.变压器供电系统电动机启动电压降计算[J].建筑电气,2015(4):18.  
LIN Huiren, LI Dandan, LIU Yong. Calculation on starting voltage drop of electric motor in power supply system of transformer[J]. Building Electricity, 2015(4):18.

(收稿日期:2021-04-20)

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Safety rules for the construction and installation of escalators and moving walks: GB 16899—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011:32.

- [3] 何东山,饶美婉,农碧林.地铁自动扶梯在线监测及预警系统的设计[J].中国电梯,2019(21):12.  
HE Dongshan, RAO Meiwan, NONG Bilin. Design of on-line monitoring and early warning system for subway escalators[J]. China Elevator, 2019(21):12.
- [4] 邝庚廉,何智超,林穗贤,等.基于图像识别算法保护小孩安全的扶梯防护系统:201610414372.8[P].2016-09-28.  
KUANG Genglian, HE Zhichao, LIN Suixian, et al. Escalator protection system for protecting children's safety based on image recognition algorithm: 201610414372.8[P]. 2016-09-28.

(收稿日期:2020-09-29)