

石化装置大功率电动机变压器 - 电动机组 起动方案研究

吴冠霖^{1*}, 刘维功¹, 郭建军², 吕晓坤²

¹中石化(大连)石油化工研究院, 辽宁 大连

²中石化宁波工程有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2023年4月12日; 录用日期: 2023年6月1日; 发布日期: 2023年6月9日

摘要

石化大功率电动机的安全快速起动是保障石化企业稳定生产的关键因素, 因此对大功率电动机起动方式的研究具有重要意义。变压器 - 电动机组起动是目前国内石化企业采用较多的一种启动方式。文章以某炼化企业的100万吨/年乙烯及配套项目空分装置电动机为工程案例, 通过设计手册算及仿真建模分析对变压器 - 电动机组起动方案的特点及经济性进行了分析。经过分析得出变压器 - 电动机组起动方式具有可靠性强、经济性强的特点, 采用此种起动方式可保障石化装置的安全稳定生产。

关键词

大功率电动机, 变压器 - 电动机组, 起动方案, 仿真分析

Study on Starting Scheme of Large Power Motor Transformer-Motor Set in Petrochemical Plant

Guanlin Wu^{1*}, Weigong Liu¹, Jianjun Guo², Xiaokun Lyu²

¹SINOPEC Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Dalian Liaoning

²SINOPEC Ningbo Engineering Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Apr. 12th, 2023; accepted: Jun. 1st, 2023; published: Jun. 9th, 2023

Abstract

The safe and fast starting of high-power motor is the key factor to ensure the stable production of

*通讯作者。

文章引用: 吴冠霖, 刘维功, 郭建军, 吕晓坤. 石化装置大功率电动机变压器-电动机组起动方案研究[J]. 电气工程, 2023, 11(2): 74-81. DOI: 10.12677/jee.2023.112009

petrochemical enterprises, therefore it has great significance to study the starting scheme of high-power motor. Transformer-motor unit starting is a kind of starting mode which is widely used in domestic petrochemical enterprises at present. This paper takes 1 million tons/year ethylene of a refinery and its supporting project air separation unit motor as an engineering case. Through calculation of design manual and simulation modeling analysis, the characteristics and economy of the starting scheme of transformer-motor unit are analyzed. Through analysis, it is concluded that the transformer-motor unit starting scheme has the characteristics of strong reliability and economy, and this starting mode can ensure the safe and stable production of petrochemical plants.

Keywords

High-Power Motor, Transformer-Motor Unit, Starting Scheme, Simulation Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着石化行业生产规模的扩大以及动力装置电气化的进程,大功率电动机在石化装置中的应用比例已越来越大,单机功率也逐渐增大[1]。大功率电动机的起动既要满足驱动设备的动力要求,又要保证所在电网的稳定。若起动方式选择不当会造成企业大面积停车中断生产,因此对大功率电动机起动方式的研究对石化企业的安全生产具有重要意义。

目前,大功率电动机的起动方式包括变压器-电动机组直接起动、自耦变压器起动、变频器起动、固态软起动、电抗器降压起动等[2] [3] [4] [5]。各类起动方式的运行性能及经济性特点各有不同。国外企业通常优先保证节能降损以及电机调速性能,不计投入及维护成本,因而较多采用变频器起动;国内企业则通常兼顾运行可靠性与成本经济性,对电抗器降压起动、变压器-电动机组起动、自耦变压器起动的方式采用较多[6] [7] [8] [9] [10]。

本文将对国内石化企业采用较多的压器-电动机组起动方式进行介绍,并以某炼化企业的工程案例,通过设计手册计算及仿真建模分析,对变压器-电动机组起动方案的特点及经济性进行分析。

2. 变压器-电动机组起动方式简述

变压器-电动机组供电和起动方式是全压起动的一种形式,由专用变压器给大功率电动机供电,变压器一侧电压为 35 kV、110 kV,二次侧电压为 6.3 kV 或 10.5 kV,变压器作为电动机的专用电源设备[11]。其供电系统主接线简单、运行可靠、维护工作量小,起动时间短;缺点是起动电流较大,约为额定电流的 4~6 倍,会造成电动机绕组过热,从而加速绝缘老化[12];起动转矩约为额定转矩的 1~2 倍,会对其拖动设备及传动部件造成一定影响[13]。但采用变压器-电动机组供电和起动时,6(10) kV 母线只有该台电动机,上级母线(35 kV 或 110 kV)的电压降较小(一般小于 10%),因此不会影响其他电气设备的正常运行[14]。

3. 变压器-电动机组起动方式案例

某炼化企业 100 万吨/年乙烯及配套项目空分装置电动机的接入电网一次系统图如图 1 所示,其主要

结构包含一次侧 110 kV 及二次侧 10 kV 线缆，额定容量为 40 MVA 的变压器，负载为一台额定功率为 27.06 MW 的空压机主电机，由变压器为电机起动供电，其具体设计参数如表 1 所示。

Table 1. Motor parameters of an air separation unit
表 1. 某空分装置电动机参数

系统参数	数值
变压器 110 kV 母线侧最小短路容量 S_{scB}/MVA	1600
110 kV 母线预接负荷的无功功率 $Q_L/Mvar$	80
额定功率 P_N/MW	27.06
额定电压 U_N/kV	10
额定容量 S_{TM}/MVA	28.5
额定功率因数	0.95
额定起动电流倍数 k_{st}	4.2
10 kV 线路阻抗 X_1/Ω	0.027
起动转矩相对值 $M_{stM}/p.u.$	1.176
压缩机静阻转矩相对值 $M_j/p.u.$	0.339
变压器额定容量 S_{rT}/MVA	40
变压器阻抗电压 $u_k/\%$	8

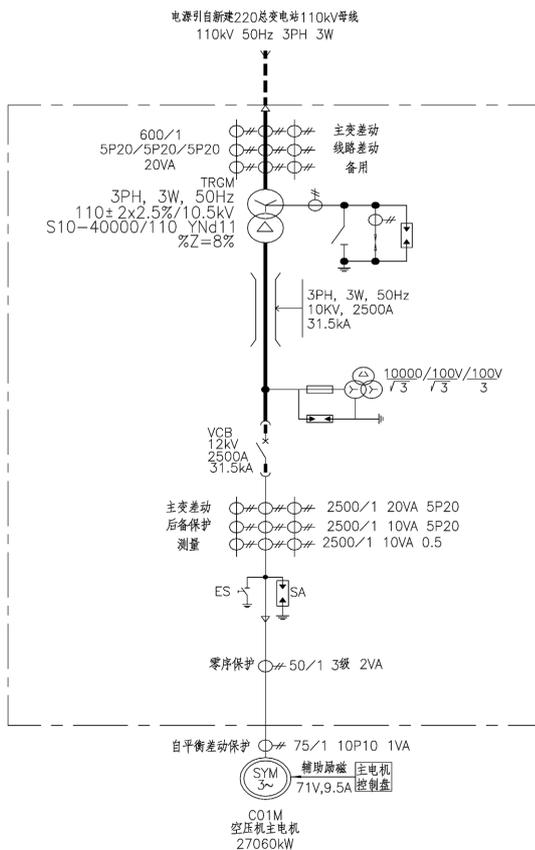


Figure 1. Primary system diagram of an air separation unit's motor connected to the power grid
图 1. 某空分装置电动机接入电网一次系统图

3.1. 设计手册计算

根据《工业与民用供电设计手册(第四版)》，计算大电机起动时母线和机端电压，并校验起动转矩 [15]。

电动机额定起动容量 S_{stM} ：

$$S_{stM} = k_{st} \times S_{rM} = 4.2 \times 28.5 = 119.7 (\text{MVA})$$

起动回路的额定输入容量：

$$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{S_{stM}} + \frac{u_k}{S_{rT}} + \frac{X_1}{U_{av}^2}} = \frac{1}{\frac{1}{119.7} + \frac{8}{100 \times 40} + \frac{0.027}{10^2}} = 94.16 (\text{MVA})$$

式中 U_{av} 为母线电压

设置起动前 110 kV 母线电压为 1.05 p.u.，则起动过程中母线电压：

$$u_{stB} \% = u_s \frac{S_{scB}}{S_{scB} + Q_L + S_{st}} \times 100\% = 1.05 \times \frac{1600}{1600 + 80 + 94.16} \times 100\% = 94.7\%$$

电动机端子电压相对值 u_{stM} ：

$$u_{stM} = u_{stB} \frac{S_{st}}{S_{stM}} = 94.7\% \times \frac{94.16}{119.7} = 74.5\%$$

$$u_{stM} \geq \sqrt{\frac{1.1M_j}{M_{stM}}} = \sqrt{\frac{1.1 \times 0.339}{1.17}} = 0.563$$

由上可知，使用设计手册计算，此大功率电动机在起动时，母线电压为 0.947 p.u.，满足大于母线电压最小值 0.9 p.u. 要求；机端电压为 0.745 p.u.，能保证起动转矩要求，因此能成功起动。

3.2. 软件仿真分析

根据图 1 系统结构和表 1 的电动机及变压器参数，使用 DIgSILENT 仿真软件进行系统建模，仿真模型如图 2 所示。仿真模型主要结构包含外部电网、一次侧 110 kV 及二次侧 10 kV 线缆、变压器及主电机，其中外部电网负载率为 43.6%，变压器负载率为 73.6%，二次侧 10 kV 线缆负载率为 80.9%，图 2 中横向线路上的三个参数依次为线缆的电压值、电压标幺值及相位，纵向线路上的三个参数依次为线路的有功功率、无功功率及功率因数。

根据图 2 所建立的变压器 - 电动机组起动仿真模型及表 1 提供的参数，并在仿真模型中设置 110 kV 母线电压标幺值为 1.05 p.u.，电动机的转动惯量为 $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，得到电动机起动的仿真结果如图 3 所示(图中结果依次为定子电流、有功功率、机械转矩和电气转矩、机端电压和 110 kV 母线电压、无功功率、转速)。

由图 3 可知，电动机机端电压为 0.745 p.u.，满足起动转矩要求，110 kV 母线电压为 0.985 p.u.，电动机起动时间为 11.643 s，电机起动后可平稳运行，母线电压稳定。

而后改变电动机的转动惯量设置分别为 $5000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 及 $8000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，电动机均可成功起动，查看电动机起动的仿真结果如表 2 所示。

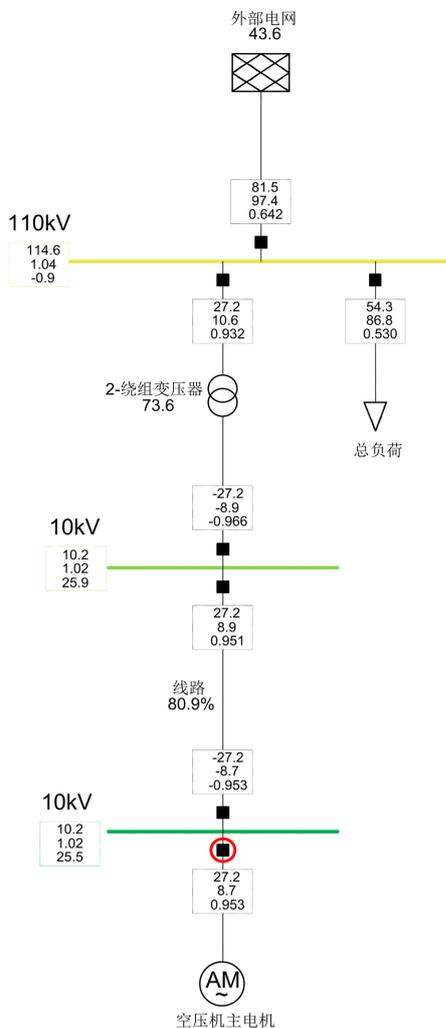


Figure 2. Simulation modeling diagram of the starting of an air separation unit' large power motor
图 2. 某空分装置大电机起动仿真建模图

Table 2. The comparison of starting simulation results of an air separation unit's large power motor under different moments of inertia

表 2. 某空分装置大电机不同转动惯量下的起动仿真结果对比

转动惯量	机端电压	母线电压	起动时间
3000 kg·m ²	0.745 p.u.	0.985 p.u.	11.643 s
5000 kg·m ²	0.745 p.u.	0.985 p.u.	24.643 s
8000 kg·m ²	0.745 p.u.	0.985 p.u.	37.993 s

由此可知，电动机的转动惯量，仅影响电动机的起动时间，对起动电压、起动电流的影响表现为时间轴上的拉伸(转动惯量变大)或收缩(转动惯量变小)，在仅分析校核电压跌落和起动电流时，可以比较粗略地设置转动惯量。

3.3. 误差分析

由设计手册计算与仿真软件分析得到的结果电动机均能成功起动，由设计手册计算得到的 110 kV 母

线电压为 0.947 p.u., 机端电压为 0.745 p.u.; 由仿真软件分析得到的 110 kV 母线电压为 0.985 p.u., 机端电压为 0.745 p.u.。两者得到的机端电压误差为 0%, 110 kV 母线电压误差为 0.038 p.u. (3.8% U_n), 证明了仿真建模计算的正确性。

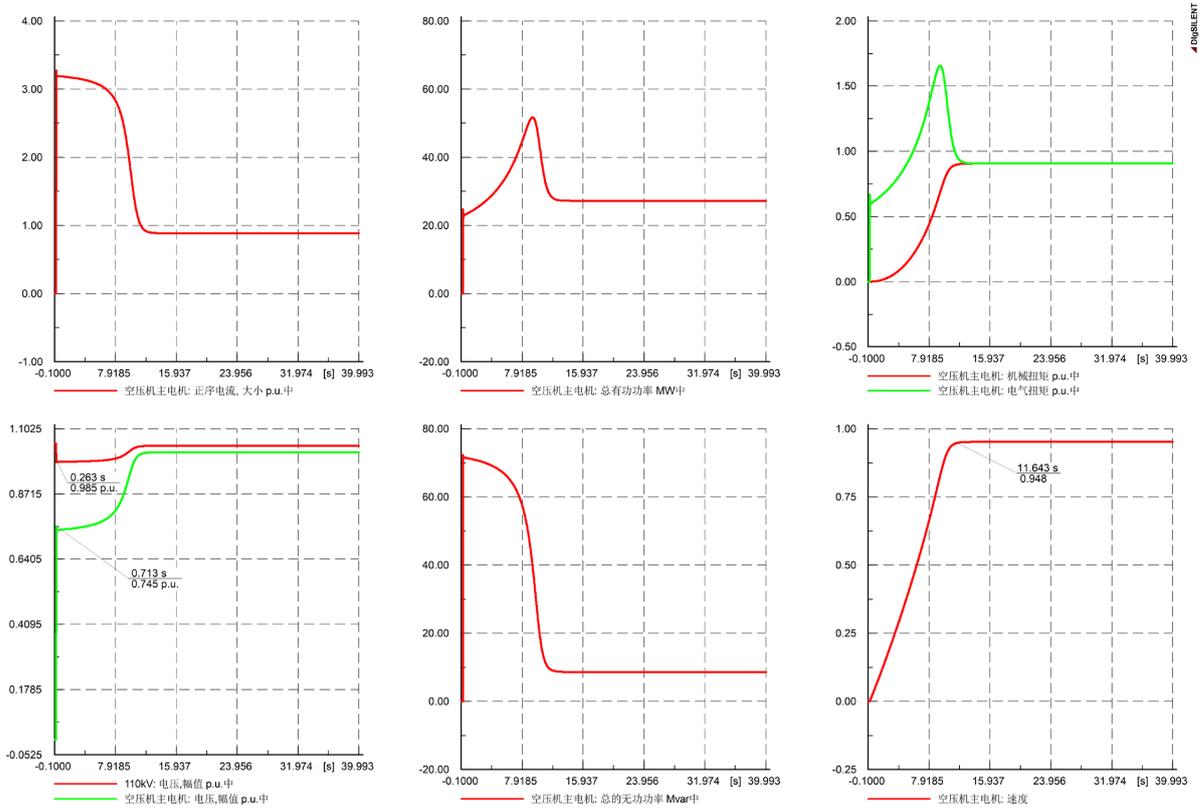


Figure 3. Simulation result of the starting of an air separation unit's large power motor
图 3. 某空分装置大电机起动机仿真结果

3.4. 变压器 - 电动机组起动经济性分析

该变压器 - 电动机组起动方式项目案例的设备投资如表 3 所示。

Table 3. Equipment investment in transformer-motor starting case

表 3. 变压器 - 电动机起动案例设备投资

名称	型号	投资
110/10.5 kV 变压器	S10-40000/110 110 ± 2 × 2.5%/10.5	220 万
110 kV 电缆	1 × 240 mm ²	70 万
110 kV 线路 变压器保护柜	2 面	10 万
10 kV 开关柜	3 面	30 万
10 kV 母线槽	13 米	10 万
10 kV 电缆	3 × 240 mm ² , 326 × 6 米	70 万
合计		410 万

变压器电动机组自 2008 年投运以来运行良好, 维护工作量很小。电动机起动时起动电流倍数为 4.1, 启动时间约为 32 秒。经调研, 同等级的电动机采用自耦变压器起动方式与变压器 - 电动机组起动方式的设备投资大致相同, 采用变频器起动方式的设备投资为变压器 - 电动机组起动方式的 3~4 倍。

3.5. 结论分析

综合设计手册计算及仿真建模计算的结果及经济性分析的结果, 采用变压器 - 电动机组起动方式电机可较快速起动, 电机起动后可平稳运行, 母线电压稳定; 具有设备少、投资省、运行可靠、维护方便等诸多优点, 特别适用于大功率电动机的起动, 采用此种起动方式可保障石化装置的安全稳定生产。

4. 变压器参数的选择

根据设计手册计算及仿真建模计算的结果分析得到变压器-电动机组在起动过程中, 虽然满足母线压降不大于 10% 的要求, 但仍会造成一定幅度的电压波动, 容易造成其他区域的电压暂降。因此须通过精确的设计计算或仿真分析合理选择变压器的参数(容量和阻抗电压), 既要满足驱动设备的动力要求, 又要保证所在电网的稳定[16] [17]。因而需要满足 1) 变压器二次侧电压, 即机端电压应达到电机额定电压的 70%, 否则会造成电机起动时间过长或起动失败; 2) 变压器一次侧母线压降不应大于 10% [18] [19]。

根据《工业与民用供配电设计手册》建议, 一般电动机功率小于 10 MW 时宜选用 35/10.5 kV 变压器, 接于 35 kV 母线; 电动机功率大于 10 MW 小于 20 MW 时宜选用 110/10.5 kV 变压器, 接于 110 kV 母线。变压器的容量宜大于电动机功率的 50%。若计算时母线压降接近临界值, 可通过降低变压器阻抗来提高母线的电压水平[20] [21]。

5. 结语

本文以某炼化企业电动机为工程案例, 通过设计手册计算及仿真建模分析对变压器 - 电动机组起动方案的特点及经济性进行了分析。得出以下结论: 1) 采用变压器 - 电动机组起动方式电机可较快速起动, 电机起动后可平稳运行, 母线电压稳定; 2) 具有设备少、投资省、运行可靠、维护方便等诸多优点。但其起动时仍会对母线电压有一定影响, 因此须合理选择变压器的参数, 以保证大功率电机起动时对企业电网的影响在合理范围中。综上所述, 变压器 - 电动机组起动方式具有可靠性强、经济性强的特点, 采用此种起动方式可保障石化装置的安全稳定生产。

参考文献

- [1] 贲红. 浅谈石化企业交流高压大电动机的起动[J]. 电气应用, 2005, 24(5): 72-74.
- [2] 周勇. 石油化工企业交流高压大电动机的起动[J]. 金山化纤, 2001(4): 49-53.
- [3] 刘维功, 郭建军, 郭君波, 等. 石化装置大功率电动机起动方案研究[J]. 安全、健康和环境, 2022, 22(7): 21-28.
- [4] 杭明. 某石化改造项目大型高压电动机起动解决方案[J]. 电气应用, 2018, 37(14): 62-65, 68.
- [5] 王平平. 几种大功率电动机起动方式的分析与比较[J]. 电子世界, 2014(16): 89, 110.
- [6] 王宏华. 高压大功率异步电动机软起动技术综述[J]. 机械制造与自动化, 2014(5): 1-5.
- [7] 张斌, 尚刚, 欧英, 等. 高压交流感应电机软启动技术的发展[J]. 变流技术与电力牵引, 2006(2): 75-78.
- [8] 杜镇辉. 软起动技术在高压大功率异步电动机启动上的应用及性能分析[J]. 科学与信息化, 2018(7): 46-47.
- [9] 袁学群. 石化装置超大型电动机起动方案的研究和确定[J]. 石油化工设计, 2012, 29(3): 4-6.
- [10] 丁旭元. 7100kW 电动机起动特性分析及起动方案设计[J]. 宁夏电力, 2012(z1): 80-84, 95.
- [11] 张宝喜. 高压大型同步电动机自耦变压器降压起动方式的探讨[J]. 天津化工, 2021, 35(6): 133-135.
- [12] 王一飞, 袁佑新, 常雨芳, 等. 高压大功率电动机软起动限流补偿与谐波滤波一体化[J]. 武汉理工大学学报,

-
- 2013(7): 140-143.
- [13] Yuan, J., Wang, C., Zhu, Y. and Chen, B.C. (2019) A Novel Soft Start Method of Super Large Capacity High Voltage Motor. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, **3**, 302-308. <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2019.00040>
- [14] Son, S.G. (2016) A Study on Improving High-Power Induction Motor Starting. *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, **9**, 178-184. <https://doi.org/10.17661/jkiect.2016.9.2.178>
- [15] 任元会. 工业与民用供配电设计手册[M]. 第四版. 北京: 中国电力出版社, 2016: 482-485.
- [16] 郑锡荣. 变压器允许全压起动电动机最大功率的计算[J]. 宁波化工, 2015(1): 33-35.
- [17] 陶骏. 石化行业大型电动机工频降压软起动方式分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2011, 27(6): 21-23.
- [18] 陈彦林. 煤矿大功率电机启动方式的分析与比较[J]. 神华科技, 2011, 9(5): 64-65, 69.
- [19] 周芹刚, 孙本胜. 大功率电机启动方式的比较与选择[J]. 氯碱工业, 2007(8): 13-15.
- [20] 李延刚. 大功率电机启动解决方案比较分析[J]. 硅谷, 2015(2): 186, 188.
- [21] 刘维巍. 浅析石化行业电动机起动方式的选择与应用[J]. 化工设计, 2013(4): 44-46.