某石化改造项目大型高压电动机起动解决方案

随着石化工业的发展，对石化装置进行挖潜、技措和技改不可避免，且随着石化装置规模的不断扩大，大型高压电动机的使用越来越广，如何解决大型石化装置改扩建工程中大型高压电动机的起动方案，一直是困扰电气人员的难题。通过某石化装置改扩建工程中大型高压电动机起动方案的研究，提出了具体解决方案，建成投运后，到达了预期的效果，对类似工程有一定的指导意义。

杭　明/南京金凌石化工程设计有限公司

杭　明/高级工程师

关键词/Keywords
石化装置·
高压电动机·
降压起动·

0　引言

随着石化装置规模的不断扩大，大型高压电动机的使用越来越广，如何确定高压电动机的起动方案，一直是设计人员关注的重点。通常设计时，由工艺专业选择（泵或风机等）负载所配标准高压电动机，将标准高压电动机参数提给电气专业，电气设计人员根据工艺提供的标准高压电动机参数，来设计供配电系统，以满足工艺设备用电要求。交流电动机起动时，电动机端子电压保证机械要求的起动转矩，且配电母线上的电压符合规范规定要求。一般优先选择直接起动方式，当直接起动方式不能满足要求时，考虑采用变压器－电动机组或采用降压起动方式（如电抗器降压起动、自耦变压器降压起动和各种软起动），这在新建项目时很容易做到。但对改扩建项目，一方面受原有总变电所的限制，按工艺选择的标准电动机参数，供电系统无法满足电动机直接起动要求；另一方面受总平面布置的限制，总平面布置没有位置布置，以实现采用变压器－电动机组起动或各种降压起动方式。在这种限制条件下如何解决高压电动机的起动问题，一直是困扰电气人员的难题。本文从各种降压起动方式的目的都是通过降低电动机端子电压，最终减小起动电流，进而减小供电系统的电压波动出发，转换思路，不按常规在外部采取降压方式来减小电动机的起动电流，而是直接限制所选高压电动机的起动电流倍数来减小电动机的起动电流，由制造厂按设计要求的起动电流倍数等参数设计高压电动机，从而解决大型高压电动机起动问题。项目实施后经实测，完全满足负载要求的起动转矩和配电母线电压要求，到达了预期的效果，对类似改造工程有指导意义。

1　某石化改造装置原始条件

某石化改造装置根据工艺条件，需要配置额定电压6 kV，额定功率9 000 kW异步电动机，负荷性质为轴流式风机，不频繁起动。为该异步电动机供电的变电所为总降110 kV变电所，所内设有4台110/6.3/6.3 kV　50/25/25 MV·A分裂变压器，其中拟为异步电动机供电的母线段，最大运行方式短路容量为181.92 MV·A，最小运行方式短路容量为153.39 MV·A，预接负荷有功功率6 000 kW，功率因数0.9；为电动机供电的电缆拟选用3拼ZR－YJV22－6/6 kV 3×240 mm^{2}铜芯电缆，电缆长度0.65 km。

2　高压电动机起动方案的选择

大型高压电动机起动方式主要为全

压起动、降压起动。其中降压起动又可分为自耦变压器降压起动、电抗器降压起动和（高压变频器、高压软起动器、水电组高压软起动器及开关变压器式高压软起动器等）软起动方式。

全压起动是最简单、最可靠和最经济的起动方式，应优先采用；但起动电流大，在配电母线上引起的电压波动也大，只有在对电网的影响能满足规范要求的前提下才能采用。

降压起动方式，起动电流小，但起动转矩也小，起动时间延长，绕组温升高，起动设备复杂，只有在不符合全压起动条件时才宜采用。

常规思路：在条件满足的情况下，应优先选择全压直接起动方式，验证是否能满足规范要求的异步电动机起动条件，即电动机起动时，其端子电压应能保证机械要求的起动转矩，且在配电系统中引起的电压波动不应妨碍其他用电设备的工作。交流电动机起动时，配电母线上的电压应符合下列规定。

1）在一般情况下，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，且电动机不频繁起动时，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。

根据原始条件，工艺选择的异步电动机参数：额定电压6 kV，额定功率9 000 kW，额定电流估算980 A，起动电流倍数按正常5倍考虑，按最小运行方式短路容量153.39 MV·A。验算电动机的起动条件，初步验算结果：配电母线电压相对值U_{qm}＝0.766，电动机端子电压相对值U_{qM}＝0.71，实际起动电流I_q＝3 353.753 A。显然配电母线电压不符合规范规定要求，应考虑降压起动方式。

各种高压电动机起动方式及其特点如表1所示。

表1　高压电动机起动方式及特点

起动方式	全压起动	变压器－电动机组起动	电抗器降压起动	自耦变压器降压起动	各种软起动
起动电压	U_n	kU_n	kU_n	kU_n	$(0.4\sim0.9)U_n$
起动电流	I_{st}	kI_{st}	kI_{st}	k^2I_{st}	$(2\sim5)I_{st}$
起动转矩	M_{st}	k^2M_{st}	k^2M_{st}	k^2M_{st}	$(0.15\sim0.8)M_{st}$
起动特点	方法简单、起动电流大、起动转矩大	起动电流较大、起动转矩较小		起动电流小、起动转矩较大	起动电流小并可调、起动转矩可调

注：U_n为标称电压；I_{st}、M_{st}为电动机的全电压起动电流和起动转矩；k为起动电压与标称电压的比值，对于自耦变压器为变比。

从表1可知，无论采用哪种降压起动方式，目的都是通过降低电动机端子电压，最终减小起动电流，进而减小供电系统的电压波动。

由于该石化装置改造项目，是在原有装置上扩能改造，受供电条件和装置总平面布置条件限制，上述任何一种降压起动方式都不具备条件，且小电动机拖动大电动机的起动方案也因没有平面布置位置而无法实施。既然降压起动的目的，都是为了减小起动电流，进而减小供电系统的电压波动；转换思路，可要求制造厂设计额定起动电流倍数小的高压异步电动机，使该设计的高压异步电动机在原始供电条件和负载条件下，全压直接起动时，能满足规范规定的电动机起动条件，达到降压起动的效果。这就涉及到利用原始条件如何计算确定高压电动机的额定起动电流倍数的问题。

3　高压电动机额定起动电流倍数等的计算确定

已知条件如表2所示。

母线电压相对值的计算公式为

$$U_{qm}=\frac{S_{km}+Q_{fh}}{S_{km}+Q_{fh}+S_q} \tag{1}$$

$$S_q=\frac{1}{\frac{1}{S_q}+\frac{X_1}{U_m^2}}=\frac{1}{\frac{1}{K_qS_{rm}}+\frac{X_1}{U_m^2}} \tag{2}$$

表2 电气参数

名 称	参 数
母线标称电压U_m/kV	6.3
母线最小短路容量S_{km}/MV·A	153.39
母线预接负荷S_{fh}/MV·A	6.66
功率因数cosφ	0.900
母线预接负荷无功Q_{fh}/Mvar	2.903
线缆截面积S/mm^2	720
线缆长度L/km	0.65
电动机静阻转矩相对值m_j	0.3
电动机平均起动转矩相对值m_{qM}	1.1
机械转动惯量GD^2/(t·m^2)	19.652
电动机型号	YNH900－4
电动机功率P_{rM}/kW	9 000
电动机转速N_r/(r/min)	1 480
电动机额定电流I_r/A	980
电动机额定起动电流倍数K_q	4.0、3.8、3.5和3.3
电动机额定电压U_r/kV	6.0
校验机械起动转矩$U_{qM}\geqslant(1.1m_j/m_{qM})^{0.5}$	$(1.1\times0.300/1.100)^{0.5}=0.548$

推导得到电机额定起动倍数K_q为

$$K_q=\frac{1}{\dfrac{U_{qm}S_{rm}}{(1-U_{qm})S_{km}+(1-U_{qm})Q_{fh}}-\dfrac{X_1S_{rm}}{U_m^2}} \tag{3}$$

按母线电压相对值分别为0.85和0.8，计算高压电动机的允许的额定起动电流倍数为2.799和4.027。咨询国内大型电动机制造厂，由于受电动机设计水平和制造能力的限制，要设计额定起动电流倍数2.8以下的高压电动机不现实。也就是说母线电压相对值按0.85控制不现实，考虑按母线电压相对值为0.8控制，并对该母线段负荷性质进行了调查，移除了原母线供电的照明负荷和对电压波动较敏感的负荷；然后电动机额定起动电流倍数K_q分别按4.0、3.8、3.6和3.4进行电动机直接起动验算，验算简化计算公式和过程如下（以最小短路容量、电动机起动电流为3.8倍额定电流为例）。

电动机起动电流倍数$K_q=I_q/I_r=3.800$。

电动机额定容量$S_{rm}=1.732U_rI_r=1.732\times6.000$ kV$\times980.000$ A/1 000$=10.184$ MV·A。

电动机额定起动容量$S_{qm}=K_qS_{rm}=3.800\times10.184$ MV·A$=38.700$ MV·A。

铜线阻抗$X_l=(0.07+6.3/\mathrm{S})L=(0.07+6.3/720.000\ \mathrm{mm^2})\times0.650$ km$=0.051$ Ω。

预接负荷$Q_{fh}=S_{fh}\sin\varphi=6.660$ MV·A$\times0.436=2.903$ Mvar。

母线短路容量$S_{km}=153.390$ MV·A。

起动回路的额定输入容量$S_q=1/(1/S_{qm}+X_l/U_m^2)=1/(1/38.700$ MV·A$+0.051$ Ω$/6.300$ kV$^2)=36.860$ MV·A。

母线电压相对值$U_{qm}=(S_{km}+Q_{fh})/(S_{km}+Q_{fh}+S_q)=(153.390$ MV·A$+2.903$ Mvar$)/(153.390$ MV·A$+2.903$ Mvar$+36.860$ MV·A$)=0.809$。

电动机端子电压相对值$U_{qM}=U_{qm}S_q/S_{qm}=0.809\times36.860$ MV·A$/38.700$ MV·A$=0.771$。

实际起动电流$I_q=U_{qm}S_q/1.732\ U_m=0.809\times36.860$ MV·A$/(1.732\times6.300$ kV$)\times1\,000=2\,733.416$ A。

计算结果如下。

母线电压相对值$U_{qm}=0.809$；

电动机端子电压相对值$U_{qM}=0.771$；

实际起动电流$I_q=2\,733.416$ A。

（1）校验机械起动转矩

电动机端子电压相对值$U_{qM}=0.771$。

电动机平均起动转矩相对值$m_{qM}=1.100$。

电动机静阻转矩相对值$m_j=0.300$。

$(1.1m_j/m_{qM})^{0.5}=(1.1\times0.300/1.100)^{0.5}=0.548$

$U_{qm}\geqslant(1.1m_j/m_{qM})^{0.5}$，所以符合要求。

（2）计算电动机起动时间

机械转动惯量GD$^2=19.652$(t·m^2)。

电动机平均起动转矩相对值$m_{qM}=1.100$。

电动机静阻转矩相对值$m_j=0.300$。

电动机转速$N_r=1\,480.000$ r/min。

电动机额定容量$P_{rM}=9\,000.000$ kW。

电动机起动时间$=(\mathrm{GD})^2N_r^2/[365P_{rm}(U_{qM}^2m_{qM}-m_j)]=19.652\times1480.000^2/[365\times9\ 000.000\times(0.771^2\times1.100-0.300)]=37.028$ s。

对供电系统不同运行方式、电动机额定起动电流倍数分别为5、4、3.8、3.6和3.4进行上述计算，结果如表3、表4所示。

由表3、表4可知，为满足配电母线上未接照明或其他对电压波动较敏感的负荷，且电动机不

表3　最小运行方式计算结果

供电母线短路容量S_{km}/MV·A	153.39（最小运行方式）				
电动机额定起动电流倍数K_q	5	4	3.8	3.6	3.4
母线电压相对值U_{qm}(%)	0.766	0.802	0.809	0.817	0.825
电动机端子电压相对值U_{qM}(%)	0.719	0.762	0.771	0.78	0.79
实际起动电流I_q/A	3354	2843	2733	2621	2506
电动机起动时间t_{st}/s	48.78	38.69	37.03	35.49	33.9
电动机静阻转矩相对值m_j	0.300（假设）				
电动机平均起动转矩相对值m_{qM}	1.100（假设）				

表4　最大运行方式计算结果

供电母线短路容量S_{km}/MV·A	181.92（最大运行方式）				
电动机额定起动电流倍数K_q	5	4	3.8	3.6	3.4
母线电压相对值U_{qm}(%)	0.795	0.827	0.834	0.841	0.848
电动机端子电压相对值U_{qM}(%)	0.746	0.786	0.794	0.803	0.812
实际起动电流I_q/A	3480	2933	2816	2697	2576
电动机起动时间t_{st}/s	41.98	34.52	33.3	32.02	30.87
电动机静阻转矩相对值m_j	0.3（假设）				
电动机平均起动转矩相对值m_{qM}	1.1（假设）				

频繁起动时，不应低于额定电压的80%的条件，假设电动机静阻转矩相对值$m_j=0.3$，电动机平均起动转矩相对值$m_{qM}=1.1$的条件下，考虑一定的可靠裕度，本石化装置改造项目设计的高压电动机额定电流为980 A时，额定起动电流倍数要求控制在不大于3.8倍，以满足规范要求。

考虑到电动机起动电压水平与电动机最小机端电压之间10%的可靠系数，则电动机最小机端电压可能的相对值为(0.771－0.10)＝0.671，以此反推要求高压电动机的最小起动转矩相对值$m_q=$0.733，即堵转转矩/额定转矩≥0.733。

4　该项目高压电动机起动方案的实施效果

按上述计算结果，与高压电动机制造厂进行了充分的技术交流，签订了技术协议，具体参数为：电动机型号YNH900－4，电动机功率9 000 kW，电动机额定电压6 kV，电动机额定电流980 A，电动机额定起动电流倍数≤3.8，，电动机转速1 480 r/min，堵转转矩/额定转矩≥0.9（考虑电动机设计制造误差而提高要求，且制造厂技术能力能满足），最大转矩/额定转矩1.7，电动机静阻转矩相对值≤0.3。现场安装后，经高压电动机直接全压起动调试和实测，实测结果：总降压变电所6 kV母线电压录波如图1所示；9 000 kW高压电动机机端电压录波如图2所示；9 000 kW高压电动机电流录波如图3所示。

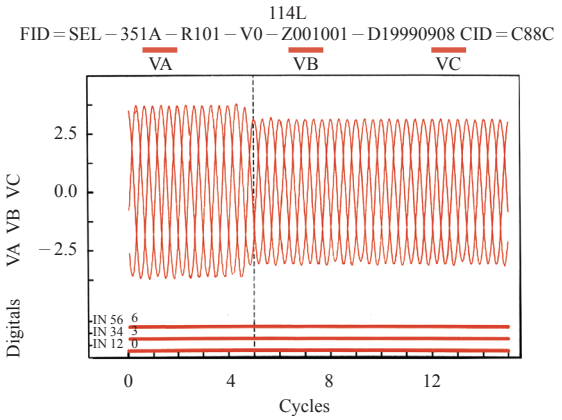

图1　总降压变电所6 kV母线电压录波

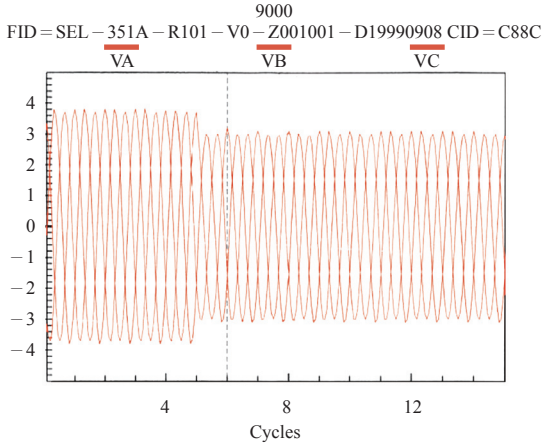

图2　9 000 kW高压电动机机端电压录波

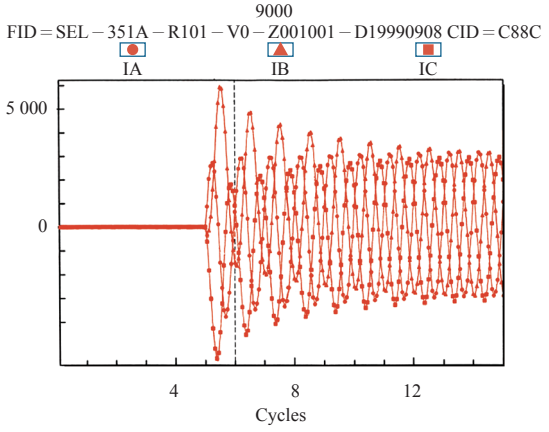

图3　9 000 kW高压电动机机端电流录波

(下转第68页)

3）综合保护定值设定人员对变压器接线组别理解不够深刻。

4）平台投入初期设备检查不到位，调试人员对于变压器差动保护知识理解不深。

4 防范和整改措施

具体的防范和整改措施如下：

1）利用本次电网解列计划，对各种保护继电器内部保护定值进行复核，避免再次出现类似问题，保障组网调试的顺利进行。

2）结合变压器铭牌参数和P631保护继电器安装位置情况，全面检查P631综合保护内部接线组网设置情况。

3）对新装设备按照国家标准进行检查审核，并制定平台电气设备调试检查表，同时形成设备调试监督机制。

4）加强施工人员技术培训，严格按照国家标准和电力行业标准施工。

5 结束语

变压器二次电流接线和P631内部保护定值设置错误是导致此次事故发生的主要原因。继电保护装置电流回路的正确与否关系到保护装置能否正确可靠动作，因此在设备投入使用前一定要制定新建设备检查制度，且必须对变压器两侧的保护继电器二次回路接线进行检查，避免出现保护继电器数据采集缺失或者测量错误等情况。在设备投入前必须要对综合保护内部定值进行复核，不能一味地按照变压器铭牌参数上的信息进行设定，一定要结合现场实际情况和综合保护安装位置等信息设定差动保护接线组别。与此同时，在保护继电器投入前一定要对设备进行测试，并确保设备正常。

此次变压器故障类型具有一定的典型性，为了避免在以后的电力组网调试过程中出现类似情况，需要施工人员和调试人员都要按照相关调试制度执行，并要加强项目的质量管理和员工技术技能培训，使施工人员掌握一定电力系统的技术知识，保障海上平台电力组网顺利进行，从而为平台安全生产提供可靠电力供应。

参考文献

[1] 张保会，尹项根．电力系统继电保护 [M]．北京：中国电力出版社，2005：40-60．

[2] AREVA．P631继电保护器使用说明书 [G]．上海：AREVA公司，2002：1-30．

（收稿日期：2017－03－22）EA

(上接第65页)

从实测录波数据显示：该高压电动机起动时，电动机最大起动电流为3 531 A，按制造厂名牌电动机额定电流983 A计算，该高压电动机实际起动电流倍数为3.592≤3.8倍；总降压变电所6 kV母线电压相对值为0.837，介于按最小运行方式和最大运行方式短路容量计算的结果之间；9 000 kW高压电动机机端电压相对值为0.815，优于按最小运行方式和最大运行方式短路容量计算的结果，达到预期效果，装置投入运行后，经过多年的运行考验，完全满足生产要求。

5 结束语

本文对某石化装置改扩建工程中大型高压电动机的起动方案进行了研究和详细的设计计算，提出了具体解决方案。建成投运后，进行了调试和测试，实测结果与设计计算吻合，且优于设计计算，到达了预期的效果，对类似改造工程或受电源条件限制的类似工程中解决高压电机的起动方案，有一定的指导意义。

参考文献

[1] 中国航空工业规划设计研究院．工业与民用配电设计手册 [M]．北京：中国电力出版社，2005．

[2] SH/T 3038—2017石油化工装置电力设计规范[S]．

[3] GB 50055—2011通用用电设备配电设计规范[S]．

（收稿日期：2017－02－10）EA