某炼厂6 kV与10 kV配电系统的对比与选择

随着国民经济快速发展，石化企业大型化趋势日益明显。合理选择配电电压等级是贯彻执行节省投资和节能减排措施的关键问题之一。近几年石化系统工程建设中，中压配电系统6 kV与10 kV两个电压等级均有广泛应用。但由于两种电压等级比较接近，在电压等级的选择上存在不同观点。结合某炼厂实例，通过对两种电压等级下基建投资、线路损耗等有关问题的对比，对合理选择电压等级进行了分析和探讨，为其他项目的电压等级选择提供参考。

李宠一　曹益新／中国石化工程建设有限公司

李宠一／工程师

关键词/Keywords
配电系统·
电压等级·
节能减排·

石化系统电压等级的确定是一个综合问题，不仅包括供电容量、负荷分布和运行方式等，还包括电能质量、有功损失、基建投资和运行维护等诸多方面问题。电压等级方案的确定，尤其是中压配电系统电压等级的确定，对简化电网层次、优化电网结构和提高配电网运行的经济性都有着至关重要的意义。传统石化企业配电系统采用6 kV电压等级较多。随着大型石化项目的建设，越来越多的10 kV配电电压等级逐渐被采用，其优势也不容否认，大有替代6 kV电压等级的势头。但是具体项目需要具体分析，6 kV相对10 kV也有其自身的特点和优势，下面通过具体实例来分析对比两种配电方案的优缺点。

项目概况

该项目为全厂性石化项目，产品既有油品、对二甲苯，又有中间产品为下游化工装置提供原料。根据国家标准GB 50052—2009《供配电系统设计规范》的规定，工艺装置中大部分用电负荷和部分公用工程用电负荷属于一级负荷，中断正常供电，将造成重大经济损失，可能引起主要设备损坏，大量产品报废，连续生产过程被打乱，需较长时间才能恢复，企业大量减产。公用工程和辅助设施中的大部分用电负荷为一、二级负荷。全厂小部分负荷为一级负荷中特别重要的负荷。所以对供电的可靠性、连续性和电气系统的稳定行要求很高。

该炼厂用电总负荷总计80.6 MW，考虑同时系数0.9后为72.5 MW，开工时用电负荷为82.8 MW；供电范围为350 m。供电方案如下，配电共分4级：220 kV，35 kV，6(10) kV，0.38及0.22 kV。

220/35 kV设总变电所1座，2路进线，总变电所设220/35 kV、150 MV·A变压器两台，为下级35 kV变电所供电，35 kV母线接线形式为单母线分段。

35/6(10) kV设区域变电所5座，变电所设35/6(10) kV变压器，6(10) kV母线接线形式为单母线分段。

6(10)/0.38 kV设装置变电所7座，变电所设6(10)/0.38 kV变压器，0.38 kV母线接线形式为单母线分段。供电方案如下图所示。

所有变电所均采用双电源的单母线分段接线，每路按100%负荷考虑。各变电所的电源进线处设开关，以保证操作灵活、检修安全。该项目35 kV及以下采用铠装交联聚乙烯铜芯电缆。

6 kV与10 kV配电方案

1. 6 kV与10 kV配电方案特点

6 kV与10 kV为石化系统广泛应用的中压配电电压等级，在石化配电系统

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

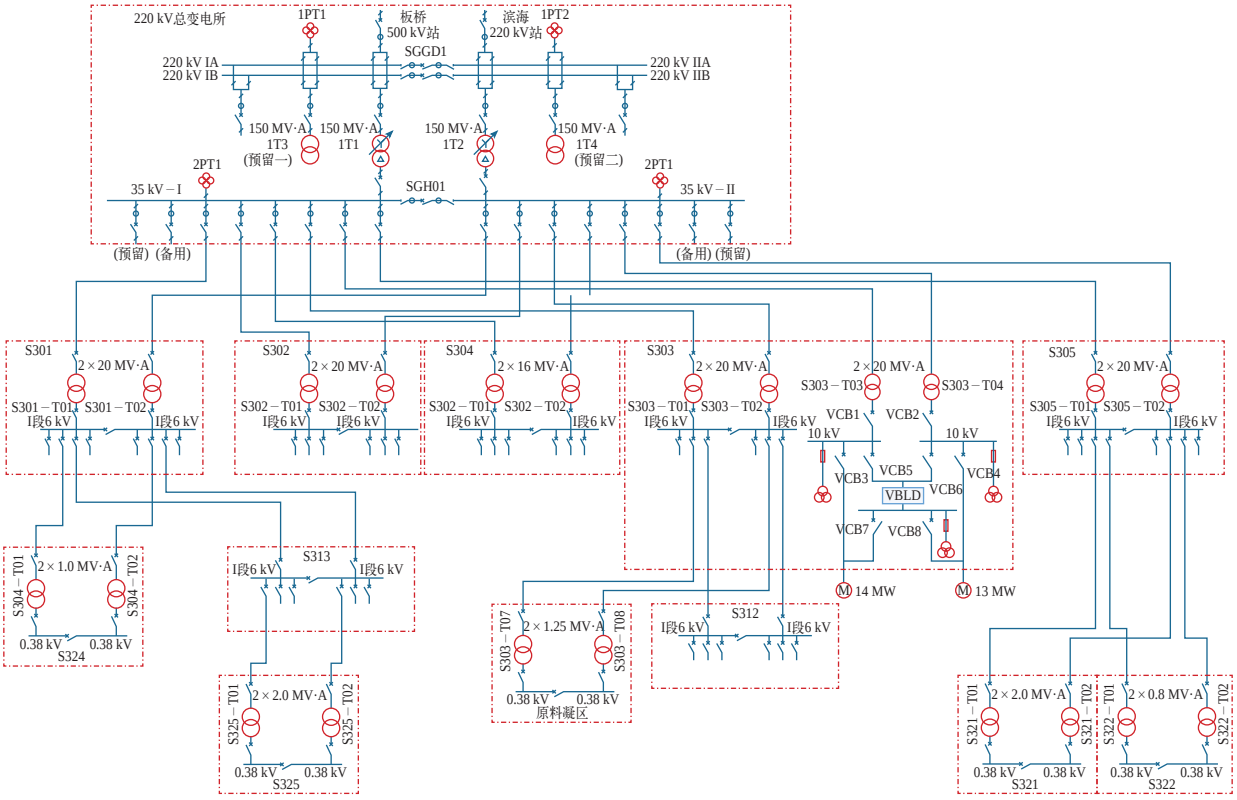

图　某炼厂供电系统图

中起着重要的作用，此电压等级既作为配电间之间的电源输送，也作为大型用电设备直接配电。本项目由区域变电所至各单元变电所的传输电压即为6(10) kV电压等级，传输至各单元变电所之后，可通过变压器为低压负荷供电。同时大功率电动机的配电也采用6(10) kV电压等级，从各变电所的中压母线处直接引致用电设备。可以说6(10) kV电压等级是石化装置配电系统的“中坚力量”。设备制造水平差别不大，目前可以采购到成熟产品。

配电间部分：6(10) kV电源，由区域变电所通过35/6(10) kV变压器，由35 kV转变而来。变电所中的6(10) kV配电母线通常采用单母线分段形式，大型电动机及下级变电所/变压器电源均直接引自6(10) kV配电母线，两段母线之间采用备用电源自动投入装置，单段母线均可独立带两段以上的全部用电负荷。中压电源可通过6(10)/0.38 kV变压器为低压母线供电， 0.38/0.22 kV用电设备由低压母线供电，6(10) kV侧采用中性点不接地系统。配电间内的配电设备（如中压开关柜、母线桥等），应满足6(10) kV电压等级的要求，配电原则采用一柜一设备配电。

室外配电部分：6(10) kV用电设备通常为大功率电动机。一般超过160 kW或200 kW的电动机，如果采用0.38 kV配电，由于运行电流、起动电流较大，机端电压损失的比例大，故选用的电缆截面积较大，同时造成的线路损耗较高，经济性较差，且电缆过大也给施工带来了困难，较大的起动电流也给低压电网带来了更大的冲击，所以该部分电动机采用6(10) kV电压配电，节省损耗，降低运行起动电流，减小电缆截面积，并减小电动机起动时对用电系统的冲击。为用电设备配电的6(10) kV电缆截面积需要按电缆长期允许载流量选择，并以短路热稳定校验。6(10) kV供配电电缆最小截面积不应小于95 mm^2（铜芯）。采用6 kV配电情况下，160 kW及以上功率电动机由中压配电。而在10 kV配电情况下，185 kW及以上功率电动机由中压配电。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2. 6 kV与10 kV配电方案对比

（1）电动机起动比较

三相电动机的额定电流I_n应按式（1）计算。由此可看出10 kV电动机电流为6 kV电动机电流的$1/\sqrt{3}$倍，相应的起动电流也为6 kV电压等级下的$1/\sqrt{3}$倍。系统在短路容量相同时，10 kV为6 kV系统短路电流的$1/\sqrt{3}$倍。故电动机起动压降计算只与系统短路容量、电动机容量和起动电流倍数有关系，与电压等级无关，即

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n\eta\cos\varphi} \quad (1)$$

式中，P_n为电动机的额定功率，kW；U_n为电动机的额定电压，kV；η为电动机的满载时效率；$\cos\varphi$为电动机的满载功率因数。

（2）供配电设备对比

为了便于对比设备，现列出该联合装置所有电动机按容量分布，如表1所示。

表1 电动机容量分布

容量/kW	数量/台
$P\geqslant1\,000$	47
$185\leqslant P<1\,000$	104
$160\leqslant P<185$	31
$P<160$	1 017

1）就变压器容量而言。由于上述两种配电方案各自特点，导致若中压采用10 kV时，由于160～185 kW（不含）电动机由6 kV降为380 V，因此变电所内部6(10)/0.38 kV等级的变压器容量将增大或台数增多。

2）就中低压开关柜而言。6 kV配电系统以160 kW电动机为界，160 kW及以上电动机均采用中压配电。10 kV配电系统以185 kW电动机为界，185 kW及以上电动机均采用中压配电。6 kV配电系统（见表1），160～185 kW电动机均需使用中压开关柜配电。相对于10 kV配电系统而言，中压开关柜增加31台，而低压开关柜减少了22台。

3）就电动机而言。同样功率的电动机，电压等级由6 kV提升至10 kV，所需费用在国内市场的价格增加10%～30%不等。

4）就电缆而言。原本在6 kV系统下为中压电动机的设备，在10 kV电压等级下，变为380 V双回路供电。且1 000 kW以上的大电动机随着电压等级的提高，额定电流降为6 kV电压等级的$1/\sqrt{3}$倍，从而电缆截面积往往比6 kV时要小1档。

按厂内联合装置不同容量电动机分布情况计算，工程造价增加约315万元，如表2所示。中压电动机价格增加约10%；大容量电动机电缆截面积降低，价格便宜了，但10 kV电压等级电缆比6 kV贵约6%，抵消后10 kV电缆造价略有增加；10 kV方案中，160～185 kW电动机由6 kV改为380 V，电动机和开关柜造价均下降，电缆造价增加，抵消后10 kV方案投资减少较明显。综合以上结果，该联合装置中压采用10 kV造价稍高于6 kV。此部分还未包含前文提到的低压变压器容量增加的费用，若包含在内，10 kV造价会更高。

表2 6 kV与10 kV方案价格比较

考虑因素	台数	电动机增加费用/万元	电缆增加费用/万元	开关柜增加费用/万元	变动小计/万元
$P\geqslant185$ kW的电动机改为10 kV电压等级（暂不考虑电缆截面积减小因素）	151	491	43.76	–	534.76
160 kW$\leqslant P<$185 kW电动机改为380 V	31	－89.28	146.39	－240	－182.89
考虑$P\geqslant1\,000$ kW电动机电缆截面积减小1档因素	47	–	－36.19	–	－36.19
合计					315.68

注：表2中各设备及电缆价格参照国内主力供应商价格计算。

（3）运行损耗对比估计

根据变压器损耗公式，如式（2）和式（3）所示，变压器损耗与电压等级无关。在用电负荷不变的情况下，上下级变压器损耗不变。因此在6 kV和10 kV两种不同方案下，变压器损耗不变。

有功功率损耗为

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \Delta P_k\left(\frac{S_c}{S_n}\right)^2 \quad (2)$$

无功功率损耗为

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_k\left(\frac{S_c}{S_n}\right)^2 \quad (3)$$

式中，S_c为变压器计算负荷，kV·A；S_n为变压器额

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定容量，kV·A；ΔP_0为变压器空载有功损耗，kW；ΔP_k为变压器满载有功损耗，kW；ΔQ_0为变压器空载无功损耗，$\Delta Q_0=I_0\%S_n/100$，kvar（$I_0\%$为变压器空载电流占额定电流的百分数）；ΔQ_k为变压器满载无功损耗，$\Delta Q_k=u_k\%S_n/100$，kvar（$u_k\%$为变压器阻抗电压占额定电压百分数）。

若配电系统采用10 kV电压等级，就185 kW以上电动机而言，导致这部分电动机运行电流减小，从而电缆的线路损耗减小。就160 kW≤P＜185 kW电动机而言，这部分电动机在6 kV电压等级时属于中压电动机，当采用10 kV系统后，采用为380 V双电缆供电，使这部分电缆的运行电流相应增大，线损增加。

三相线路中有功及无功功率损耗公式，如式（4）、式（5）所示。通过上述公式，可得出在不同电压等级下，电动机的线路损耗。为了便于统计，在计算损耗前，可根据电动机功率分布情况，将151台（含运行与备用电动机）P≥185 kW的电动机的总功率等效为运行的78台800 kW的电动机；将31台（含运行与备用电动机）160 kW≤P＜185 kW电动机的总功率等效为运行的16台160 kW电动机。按年运行7 500 h，电费为0.5元/kW·h假设。

有功功率损耗为

$$\Delta P_L=3I_c^2R\times10^{-3} \quad (4)$$

无功功率损耗为

$$\Delta Q_L=3I_c^2X\times10^{-3} \quad (5)$$

式中，R为每相线路电阻，$R=rl$；X为每相线路电抗，$X=xl$；I_c为计算相电流，A。其中，l为线路计算长度，km；r、x为线路单位长度的交流电阻及电抗。

表3　6 kV与10 kV方案运行损耗对比

考虑因素	等效台数	6 kV时损耗/kW	10 kV时损耗/kW	损耗波动/kW	损耗金额/万元
P≥185 kW电动机改为10 kV	78	137.22	66.87	−70.35	−26.38
考虑因素	等效台数	6 kV时损耗/kW	380 V损耗/kW	损耗波动/kW	损耗金额/万元
160 kW≤P＜185 kW电动机改为380 V	16	1.52	110.93	109.41	41.03
年运行费用合计增加/万元					14.65

注：表3中所有线路阻抗数据，参考《工业与民用配电计算手册》第三版。

通过表3，可得出系统改为10 kV电压等级后，年运行费用增加了14.65万元。表3中还没有考虑10 kV电压等级下的电动机较之6 kV电压等级下电动机效率通常会略有降低，功率因数会略有下降。

结束语

以上对比可知，设备基建的一次投资节省约为315.68万元，每年的运行损耗节省约为14.65万元。因此该项目使用6 kV配电，无论是从设备基建的一次投资，还是工厂长年运行的损耗上看，经济性较10 kV配电电压等级更佳。

近年来10 kV越来越多地在大型石化装置中采用，6 kV的采用已经越来越少，但通过本文的具体实例来看，10 kV 配电的性能与6 kV相比提升并不大，并且6 kV配电具有更好的经济性。大型炼厂中电动机的功率分布和供电范围等都是影响中压配电系统经济性的重要因素。所以在大型炼厂中压配电等级的选择上，具体使用6 kV还是10 kV需要根据项目的具体情况，从基建投资及运行线损、经济性等方面具体考虑，综合对比，选择最佳方案。

参考文献

[1] 魏运军，董家读．中压配电网电压比较研究 [J]．电气开关，2014 (4)．

[2] 李金芳，刘宗岐，张建华，等．中压配电电压等级选择研究 [J]．现代电力，2009，26 (4)．

[3] 朱忠亭．大容量机组高压厂用电压等级技术性能比较 [J]．电力勘查设计，2007 (1)．

（收稿日期：2015－01－02）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net