[变压器]

海上升压站主变压器选择比较与分析

文/上海勘测设计研究院有限公司　赵钢超

海上升压站是整个海上风电场工程的心脏，而主变压器又是海上升压站的关键设备，其绕组型式和容量的选择非常重要。针对不同规模的海上风电场，提出了主变压器绕组型式选择的依据，并结合工程实例进一步提出一种主变压器容量选择的方案，以期在满足可靠性的基础上，减少整个工程投资。

海上风电场具有风速高、风力稳定、利用小时数高、空间广阔且适宜大规模开发等特点，其开发和利用受到了广泛的关注。与陆地风电相比，海上风电风能资源的能量效益比陆地风电场高20%～40%，还具有不占地、风速高、电量大以及运行稳定等优势，同时，海上风力发电是国家“十三五”新能源规划中的重点产业，是推动沿海经济向能源转型方向发展的一种重要手段。截至2018年底，全国风电累计并网达到1.84亿kW，以风电和光伏为代表的新能源发电装机已超过水电成为我国第二大类电源。

海上升压站主变压器绕组型式选择

目前，国内已建成的单个海上风电场容量一般多为200 MW、300 MW及400 MW等，通常考虑设置两台220 kV主变压器，其绕组型式可选用双绕组或低压侧双分裂绕组变压器两种。不同规模海上风电场其主变压器具体型式的选择主要由距离海上升压站最近一台风机35 kV侧的短路电流值确定。

以某200 MW海上风场为例，采用两台120 MV·A的双绕组变压器和两台120/60～60 MV·A的低压侧双分裂绕组变压器，其35 kV侧短路电流如表1所示。

表1　200 MW海上风场35 kV侧短路电流值

变压器型式	双绕组/kA	低压侧双分裂绕组/kA
35 kV侧短路电流	16.45	9.87

以某300 MW海上风场为例，采用两台180 MV·A的双绕组变压器和两台180/90～90 MV·A的低压侧双分裂绕组变压器，其35 kV侧短路电流如表2所示。

表2　300 MW海上风场35 kV侧短路电流值

变压器型式	双绕组/kA	低压侧双分裂绕组/kA
35 kV侧短路电流	20.8	11.15

以某400 MW海上风场为例，采用两台240 MV·A的双绕组变压器（阻抗16%）和两台240/120～120 MV·A的低压侧双分裂绕组变压器，其35 kV侧短路电流如表3所示。

表3　400 MW海上风场35 kV侧短路电流值

变压器型式	双绕组/kA	低压侧双分裂绕组/kA
35 kV侧短路电流	30.1	14.86

由上述可知，一般情况下当整个风电场的容量为200 MW时，两种类型的主变压器35 kV侧的短路电流均小于20 kA，满足风机内环网柜短路电流开断能力要求，为此可采用双绕组变压器或低压侧双分裂绕组变压器；当整个风电场的容量为300 MW、400 MW及以上时，如采用双绕组变压

器，35 kV侧的短路电流通常大于20 kA，大于风机内环网柜短路电流开断能力，为限制短路电流推荐采用低压侧双分裂绕组变压器。

同时，对于低压侧双分裂绕组变压器，其两个低压绕组相互独立，当其中一个绕组发生故障时，另一个绕组仍可正常工作，提高了可靠性。

主变压器容量和台数的选择

由于海上风电场一般离岸距离较远、装机容量较大，而升压站的工作环境又非常特殊，当主变压器发生故障时，若碰到天气条件恶劣的情况下无法及时出海进行维修，造成风电场长时间限发或停运，带来发电量的很大损失。此外，如主变压器出现较大故障需返厂维修，则需动用大型浮吊船，其停运时间更长。

目前对于陆上风电场发电同时率的统计结果为70%左右，而海上风力发电场由于不受地形因素影响，发电同时率理论上将高于陆上风电场。为此，国内目前海上风电场单个容量大于150 MW且小于500 MW时，一般考虑安装2台主变压器，每台变压器容量考虑一定的冗余度；海上风电场容量大于500 MW时，需考虑3台及以上的主变压器，鉴于其中一台变压器故障时，可利用率不小于66.7%，为此各主变压器可不设冗余。

据不完全统计，国外已投运海上风力发电场（主要是欧洲）升压站中，主变压器冗余度20%以下的占34%，20%～50%的占40%，50%及以上的占26%；国内海上风电场由于风资源条件普遍较欧洲风场差，如考虑较大的冗余度其经济性不佳，为此国内已建海上风电场主变压器冗余度多在0~20%之间。实际工程中单台主变压器容量冗余度的选择，需要根据整个风电场的风资源情况，考虑全寿命周期内故障情况下发电量损失和初始投资经济性比较后确定 。

实例分析

某海上风电场规划总装机容量为40万kW，风电场内配套建设一座220 kV海上升压站，通过两回3 × 500 mm^{2}的220 kV海缆上岸接入陆上集控中心后送出至电网。海上升压站设置2台低压侧双分裂绕组主变压器，单台变压器容量可以选择0～20%的冗余，即200 MV·A和240 MV·A两种。其中，容量为200 MV·A的变压器初始投资及运行期损耗较小，但其中一台变压器发生故障时，发电量损失较大；但选用容量为240 MV·A的变压器初始投资及运行损耗较大，但其中一台变压器发生故障时，发电量损失较小。因此，变压器容量的选择要根据工程所在地风资源情况，综合固定投资成本和损失费用等进行比较后确定。

本工程风电场代表年100 m高度风速和输出功率的关系、风速和年运行时间的关系如图1和图2所示。

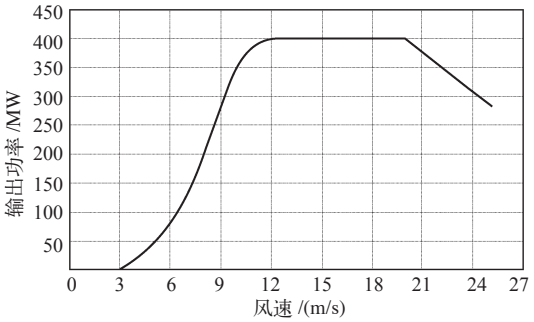

图1　90 m高度风速和风场输出功率关系曲线

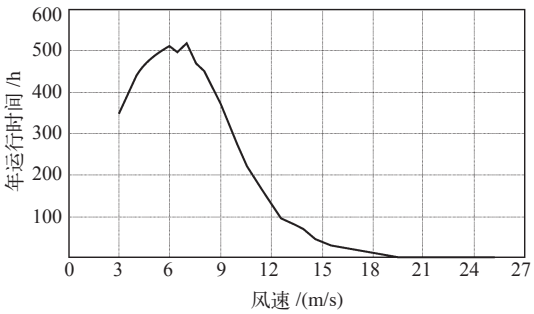

图2　90 m高度风速和年运行时间关系曲线

1．固定成本

主变压器容量不考虑冗余度和考虑20%冗余两个方案，除主变压器以外的其他高、低压侧设备均相同，因此其固定成本的差异主要体现在主变压器的设备造价和运行损耗两个方面。

两个方案主变压器的固定成本经济性比较如表4所示。

表4　变压器固定成本经济性比较

项目	200 MV·A	240 MV·A
设备数量/台	2	2
设备造价/万元	1 540	1 730
主变压器电能损耗/万元	3 568	3 291
费用总计/万元	5 108	5 021
可比投资/万元	87	0

注：电能损耗以4.9%利率对25年运行期进行折现，上网电价取0.85元/kW·h。

2．故障工况下损失电量

根据大数据统计，国内220 kV主变压器的故障率约为0.054 4次/百台·年，主变压器按风电场运行年限25年，故障次数为$N = 0.0544 \times 25 = 1.36$

（下转第48页）

2．温度影响的应对措施

针对温度的影响，从以下两方面进行应对：①由于高海拔地区空气稀薄会导致风流量减少，直接影响风冷系统的散热，也间接影响水冷系统的散热，因此在装置设计时应适当增加散热器或风机的数量和降低系统的额定输出电流使用。②功率器件选型时应考虑低温影响，尽量选择抗低温器件，同时增加封装外壳的防护等级及在装置内部设置加热除湿装置。

3．干燥气候影响的应对措施

针对干燥气候的影响，从以下三方面进行应对：①功率器件及设备选型时应充分考虑抗静电措施。②装置外壳及金属零部件应连续导通，金属零部件间应保持良好的面接触，装置整体应采用单点接地。③装置电气设计时，应考虑采用滤波技术和光电耦合技术。

4．雷暴影响的应对措施

针对雷暴的影响，结合当地的气候特征，在装置内部增加防雷保护单元，改进元器件布置、安装位置和接地方式等，条件允许的情况下，装置尽量放置在牵引变电所防雷针保护的范围内。EA

（收稿日期：2020.01.09）

（编辑：朱金凤）

（上接第45页）

次。为便于比较，海上风电场25年运行期间主变压器按检修一次考虑。

陆上220kV电压等级变压器可用系数为99.887%，每年变压器故障停运时间为$T=8\,760\times(1-99.887\%)=9.9$ h。按每年变压器故障停运时间10 h计，则25年运行期间，主变压器故障停运时间约为250 h。考虑到海上升压站变压器的运维和修理难度较大，故障停运时间可能有较大增加，本报告按750 h计。

考虑变压器在25年运行期间需进行一次长时间的检修，按照4.2 MW的功率曲线计算风场出力。

当风速高于25 m/s时，风机处于停机状态。经计算，在风速在8 m/s以下时，风电场输出功率小于200 MW，当主变压器故障发生在风速在8m/s以下时，两种主变压器方案输出容量均为风力发电机组发出的全部电量。

当风速为8.5～25 m/s 时，风电场输出功率大于240 MW，此时200 MV·A主变压器输出功率为200 MW，240 MV·A主变压器输出功率为240 MW。

当风速为8～8.5m/s时，风电场输出功率在200～240 MW，此时200 MV·A主变压器输出功率为200 MW，240 MV·A主变压器输出功率为风电场输出功率。

根据风电场代表年风速频率统计，当主变压器故障发生在风速8～25 m/s 阶段时，若选用200 MV·A主变压器相比240 MV·A主变压器电量损失如表5所示。

表5　风电场损失电量统计表

风速/(m/s)	损失功率/MW	停运时间/h	损失费用/万元
8～8.5	20	38.25	65.02
8.5～25	40	228.75	777.75

注：1. 风速为8～8.5 m/s 时，风电场输出功率为风速段平均功率。
2. 停运时间为750 h×5.1%＝38.25 h，750 h×30.5%＝228.75 h。
3. 电价按照现行上网电价0.85元/kW·h计算。

3．小结

变压器投资、损耗和故障时停运电量损失经济性比较如表6所示。

表6　综合经济性比较表

项目	200 MV·A	240 MV·A
设备数量/台	2	2
设备造价/万元	1 540	1 730
主变压器电能损耗/万元	3 568	3 291
发电量相对损失/万元	843	0
可比投资/万元	930	0

通过上述分析，海上升压站设置2台主变压器，每台主变压器容量设置20%的冗余经济性更好。

结束语

一般情况下当整个风电场的容量为200 MW时，可采用双绕组变压器或低压侧双分裂绕组变压器；大于300 MW时，推荐采用低压侧双分裂绕组变压器。对于主变压器容量和台数的选择，小于150 MW时，可仅设置一台主变压器；当整个风电场的容量大于150 MW但小于500 MW时，可设置2台主变压器，每台变压器容量设置20%的冗余；大于500 MW时，需设置3台及以上的主变压器，变压器容量可不考虑冗余。EA

（收稿日期：2019.12.30）

（编辑：朱金凤）