

关于船电中压系统的思考

电站

2

张灼端

1 问题的提出

在船舶经营洽谈中不时地遇到要采用中压系统的船舶,所谓中压系统是指电压为 1kV 至 11kV 的电力系统。在以往的洽谈中所遇到中压系统,大体上有三种类型:一是大功率机械工程船,如 125000t 油船改装为布管工程船,船上有 8 台 4000kW 的推进电动机,还有 4 台功率分别为 1580kW, 2420kW, 2380kW 和 2820kW 的布管机械电机,以及 2 台 1300kW 的管子吊机,该船采用 3300V 中压系统。二是有如首侧推这样单一大功率负载的船舶,根据其功率的大小选用 3300V 中压系统或 440V 低压系统,这种类型的产品较多。三是大功率电力推进船舶,如 13000t 化学品和成品油轮,它使用了 60000kW 可回转式电力推进器,选用 9kV 中压系统。

挪威 8000/12000t 滚装船有二台 440V 1000kW 首侧推。有人提议首侧推的电压改为 6600V,这样,所用电缆可从 18 根 $3 \times 120\text{mm}^2$ 减为 2 根 $3 \times 50\text{mm}^2$,每根电缆按 200m 计,共节省电缆 3200m,另外可减少 16 根粗电缆敷设和水密贯穿的困难。这里给我们提出了一个应如何合理选择中压系统电压等级的问题,以及中压系统还需考虑的其它问题。

2 大功率电机带来的问题

电机的功率是与电压和电流的乘积成正比。电压给定后,电流就与功率成正比。一台 440V 2300kW 的电动机,其额定电流达 3772A,需要用 $3 \times 120\text{mm}^2$ 电缆 20 根并联供电,这对电机的设计和电缆的连接都带来一些麻烦。因此,大功率电机需提高其电压

以降低其电流值,这样就出现了中压系统和高压系统。船上只用到中压系统。

拖动电机功率的增大同时也增大了电站容量。如 125000t 布管船,其电站总容量达 42290kVA, 8000/12000t 滚装船电站容量也达 6600kW, 13000t 化学品和成品油轮的电站总功率将近 8000kW。

大容量的电站若发生短路故障,其短路电流值远远超过低压电器中线路开关的通断能力。著名的美国通用电气公司的 THS 系列开关,美国西屋电公司的 PB 系列开关,德国 AEG 公司的 ME 系列开关,日本寺崎公司的 AH 系列开关,以及原苏联的 АБЭ 系列开关的最大额定电流约为 4kA。通断能力也在 60kA (有效值) 以下。(注:这是本人 80 年代末所收集到的资料,目前已有新的发展,如日本寺崎已生产有 5kA 和 6kA 的开关,其它厂家资料尚未得到)。总之,400V 低压大功率电网受配电保护装置最大通断能力以及电动稳定性和热稳定性的限制也需转向中压系统。

英国劳氏船级社认为:当系统故障容量在正常情况下超过 50000kVA 时,以及发电机单机容量超过 2500kW 时均适于采用中压系统。

中压系统的电压在 1kV 至 11kV 之间,其中常用的有 3300V/3000V、6600V/6300V、11000V/10000V 等三个等级,上述等级中分子、分母分别表示频率为 60Hz 和 50Hz 时的额定电压值。

即使船上电站采用了中压系统后,仍需要有低压电力系统供其余小功率用电。从电机、保护装置、电缆等方面来权衡后,英国 LR 船级社曾指出:采用 3000V 中压电动机

其容量应不少于 200kW；采用 6000V 中压电动机的则应不少于 400kW。法国 BV 船级社也指出：功率小于 150kW 的电动机不应采用中压供电。

由于船上地方小，设备安装位置狭窄，给大截面电缆的敷设和设备进线增加很大困难。所以船上采用中压系统的电机功率值要低于陆上设备。根据我厂施工经验，船上使用 $3 \times 150\text{mm}^2$ 电缆时进线是非常困难的，更不会去选用更大截面的电缆，我们常以多根 $3 \times 120\text{mm}^2$ 电缆并联使用。设备进线能并多少接线端子，虽无人去研究，然而要解决十多根电缆接线端子的并联总是较困难的。船上时有出现单一大功率电力设备，如首侧推之类负荷，其功率常在 500—1500kW。这里也出现多大功率时采用中压供电为好的问题。譬如一台 1000kW 的首侧推 440V 时的电流为 1640A，要选用 9 根 $3 \times 120\text{mm}^2$ 电缆并联，如果改用 3300V 电压后，仅须用 1 根 $3 \times 120\text{mm}^2$ 电缆，这样给施工带来极大方便。从机舱到首部的距离较远，所节省下的电缆费用也很可观。但电机由于电压提高后价格的提高，远超过电缆所节省下来的费用。然而施工的方便也是一个吸引力，经权衡后是可以考虑采用 3300V 电压等级。一般认为电机功率达 1500kW 时，两者的费用方可持平。

3 低压电站的功率极限

各级电压电站的功率均受到配电保护装置的最大通断能力以及电动稳定性和热稳定性的限制。原苏联对提高 400V 低压系统功率极限作了大量研究，如采用限流装置和研制高电抗的发电机等措施。并得出结论：当限流装置、发电机、励磁系统和配电保护装置的参数比最佳时（发电机超瞬态电抗标么值应在 0.2—0.3 之间，限流馈电电抗器的电感值在 0.05—0.1 之间，分区电抗器的电感值在 0.2—0.5 之间），400V 系统即可在并联工作中其发电机单机功率可达 6000

—9000kW。若不用短路电流限制装置时，电站极限功率为 3200kW。尽管目前线路保护开关的通断能力在不断提高，如日本寺崎最近几年接连推出额定电流达 5kA 和 6kA 两种线路保护开关，其能断能力达 70kA（有效值）。但这些都不能解决根本问题，还必须使用中压系统。

中压系统同样也存在着极限功率问题，但其极限值较大，并认为 3300V 电站的极限功率为 20000kW；6600V 电站的极限功率为 40000kW；11000V 电站的极限功率为 70000kW。

这里研究各电压等级电站极限功率的目的在于了解各级电站功率的大概范围，而不是去限制选用高一档电压等级。实际上影响船上选用电压等级的不在于系统的保护能力，而在于施工条件，特别是电缆进线。

4 经济性分析

中压电机由于绝缘材料耐压等级的提高而使电机的体积和重量都增大了。同一机座号电机，当额定电压提高时其额定功率要下降。以手头上可查到的一些产品样本为例，如芬兰 STROMBERY 公司船用电机中 6 极 HSP-11/75 发电机，在额定电压为 400V 时容量为 1825kVA，当电压提高到 6300V 时其容量降到 1625kVA；8 极 HSP-12/754 发电机，在额定电压为 400V 时容量为 2300kVA，当电压提高到 6300V 时其容量降至 2125kVA，若电压再提高到 10500V 时容量要降至 1875kVA。国产陆用 JS 系列电动机中，3000V 150kW 电动机与 380V 180kW 电动机的体积和重量相同。从上述分析中显而易见，同一功率的电机随着其额定电压的提高，电机重量要增大，其价格也必然上升。普遍认为当电机功率超过 2000kW 后，中压电机的价格才能与低压电机持平。同样一台 1000kW 的首侧推，由于所配电机的电压等级不同，价格相差大约是：3300V 的要比 440V 的贵 4 万美元，而 6600V 的则比 440V

的贵 6 万美元。不同电压等级的电缆差价以大截面 $3 \times 120\text{mm}^2$ 电缆为例, 3300V 的约为 440V 的 1.3 倍, 6600V 的则为 440V 的 1.4 倍。

从节省电缆的角度来分析, 中压系统要比低压系统优越得多, 也是最迷人的。同一功率时, 当电压从 440V 提高到 6600V, 即上升了 15 倍, 其额定电流则下降为 1/15。以挪威 8000/12000t 滚装船的 2300kW 轴带发电机为例, 440V 时要用 20 根 $3 \times 120\text{mm}^2$ 的电缆并联供电, 改用 6600V 后仅需 1 根 $3 \times 150\text{mm}^2$ 电缆。每根电缆按 13000 元计算, 便可节约 247000 元。然而, 从电缆上所节省下来的钱是远远不足弥补设备由低压改为中压后所增加的费用。

就以挪威滚装船的首侧推为例, 2 台首侧推电压由 440V 改为 6600V 后, 所用电缆可从 18 根 $3 \times 120\text{mm}^2$ 减为 2 根 $3 \times 50\text{mm}^2$, 每根电缆按 200m 计, 共节省电缆 3200m。可节约电缆费用 83.2 万元 (约合 10.4 万美元)。而首侧推的价格, 挪威一厂家对 440V 的报价为 117.5 万克朗, 而对 6600V 的报价为 157.5 万克朗, 差价达 40 万克朗 (约 6 万美元)。2 台首侧推差价共 12 万美元。由于首侧推采用中压供电, 还须配置 440V/6600V 1300kVA 升压变压器 2 台, 价格为 1000 万日元 (约合 10 万美元)。即单首侧推一项改用中压系统后就须净增加费用 11 万美元。虽然升压后减少了 16 根粗电缆敷设和贯穿水密舱壁困难并节省了工时费用, 但中压系统所增加防护措施的费用也很可观, 另外还须增加中压系统试验设备的费用。使总增加的费用大大超过 11 万美元。

如果将 2 台轴带发电机也改为 6600V 后, 直接向首侧推供电, 这样是否可节省费用呢? 答案仍是否定的。因为首侧推仅是在进出港靠离码头时用, 正常海上航行时, 轴带发电机还必须向全船供电, 还得将 6600V 降至 440V 才能向全船供电, 所以 2 台变压器不能少 (其中一台作为备用), 价值 10 万

美元。2 台轴带发电机改为中压后价格也上升了好多, 所以说不宜采用。

5 关于中压系统还应考虑的其它问题

5.1 单一中压负载时的保护 (主要是针对首侧推这样单独负载)

这里引用 IEC 92-503 出版物中的一些规定:

“当一个单独的负载, 例如首侧推器, 直接通过升压变压器的高压侧供电时, 则认为在变压器的低压侧进行保护就足够了。”

“变压器原边的短路保护用断路器为好。”

“在系统内应装设对任何接地故障报警的指示措施。”

“带外壳的变压器仅安装在只限于有关人员出入的舱室时, 其防护等级至少为 IP23。安装在其他处所的变压器其防护等级至少为 IP54。”

5.2 电缆敷设时的注意事项

① 中压系统的电缆需与低压系统分离敷设, 一般要求至少分离 60mm。

② 具有金属护套或铠装, 并作有效接地的电缆可敞开敷设, 否则应穿管敷设。

③ 中压电缆应不经过起居处所敷设。

④ 中压电缆应在明显处作耐久标志。

5.3 电工持证问题

中压系统作业电工必须持有上岗证方可操作。目前我公司船舶电工中还没有持有中压电工证的, 须培训取证。临时措施是向设备动力处借用持证电工, 这也是兄弟厂可取的经验。

在与国外船东洽谈中也出现类似问题, 如瑞典 14000 t 滚纸和集装箱船的船东就坚持用 380V 的首侧推, 理由是若用 3000V 时, 则劳工组织要求配备专门的电工。

6 结论

船上电力负荷功率的增大, 将给设备和

电缆的安装进线带来不便,同时低压线路开关保护能力也跟不上,用提高电压等级的办法来减少电流缩小电缆截面,以达到施工的方便,并解决了系统保护问题。随着科技的发展,低压线路开关的通断能力不断增大,440V 电站极限功率也在提高。所以,决定船上是否要采用中压系统的因素不在于保护开关的通断能力,而在于船上施工的困难程度。大功率首侧推的使用,也引导了船上使用中压系统,对这种单一中压负载的升压变压器保护,国际电工委员会推荐标准规定仅需实行低压侧保护,也被各船级社所采纳。从电机价格上看,虽然要超过 2000kW 时中压与低压的费用可持平,但象首侧推这样负载,馈线电缆长度大,采用中压系统后所节省的费用也多,可考虑采用中压系统的功率可降至 1500kW。低压电力设备的价格毕竟要比中压的便宜,应首选低压电力系统。6600V 和 3300V 虽同属于中压,但不是一个等级,例如最小相间间隙和最小对地间距的要求几乎相差一倍,3300V 为 55mm 而 6600V 为 100mm。6600V 设备的价格要贵过 3300V 设备。所以,中压系统也应首电压较低的 3300V

系统,而不应急跳过档。不要仅考虑电压提高后能节约多少电缆,要权衡整个系统的费用以及施工的方便性。有人说,挪威 8800/12000t 滚装船上有二台首侧推,合起来功率已达 2000kW,超过了至少要达 1500kW 才可考虑采用中压系统的经济性分析,应考虑采用中压系统。这样考虑的方法是错误的,因若各用一台升压变压器,其功率仍为 1000kW,经济上是划不来的;若共用一台升压变压器,那它就不属于单一负载,变压器两侧都得要有保护,还得增加一个中压配电柜,经济上也划不来。所以,挪威滚装船的首侧推不宜采用 3300V 系统,更不宜选用 6600V 系统。至于 13000t 化学品和成品油船的电力推进也不宜采用 9kV 系统,应选用 3300V 系统为好。

参考文献

- 1 关于大功率电站电压选择的建议. Судостроение 1986, 4.
- 2 电压大于 1 千伏至小于或等于 11 千伏的交流供电系统. IEC 92-503 出版物.



930 (I) 船下水瞬间
(李长瑞 摄)