

大规模海上风电场输电方式的探讨

朱宜飞, 陶铁铃

(长江勘测规划设计研究院新能源公司, 武汉 430010)

[摘要] 分析了大规模海上风电场的并网需求, 比较了高压交流输电系统、基于电网换相换流器的高直流输电系统和电压源换流器的直流输电系统的技术特点, 对系统损耗做了数值分析, 从而得出各种输电系统的适用范围。

[关键词] 海上风电; 高压交流输电; 高压直流输电; 电网换相换流器; 电压源换流器

[中图分类号] F4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)11-0089-04

1 前言

根据国内实际情况, 探讨了未来海上风电场并网所面临大容量长距离的电能输送问题, 以寻找适合中国国情的海上风电场发展模式。

2 海上风电场输电方式和机组简介

2.1 海上风电场的机组形式

风力发电机组主要划分为恒速机和变速机两大类, 根据目前的发展趋势, 双馈变速异步机组和直驱同步组已逐渐成为主流。双馈机组的特性是定子直接与电网相连而转子通过换流器与电网相连, 该系统允许电机转速在额定转速的 60% ~ 110% 之间变化, 而且换流器额定容量达到风机额定功率的 30% 即可。直驱同步机组采用永磁电机, 定子通过换流器与电网相连, 该系统允许电机转速在更大范围内变化, 由此可以省掉变速箱。风电机组的单机容量也在日益增大, 5 MW 的机组即将投入使用, 未来 8 ~ 10 MW 的机组亦在规划之中。同时机端电压也相应升高, 目前已有少数机组的机端电压超过 1 000 V, 但升高机端电压的同时必须提高绝缘等级从而占用更多的机组空间, 因此未来机端电压的升高将是十分有限的。基于以上原因, 在后述的模型

中, 海上风电机组按 5 MW 永磁直驱机组考虑, 机端电压设为 2 000 V。

2.2 高压交流输电系统

迄今为止所有已建成海上风电场均采用高压交流输电系统(HVAC), 其由以下几部分组成: a. 交流集电线路; b. 海上升压站和无功补偿设备; c. 三芯 XLPE 交联海底电缆; d. 陆上变电站和无功补偿设备。典型的高压交流输电系统见图 1。

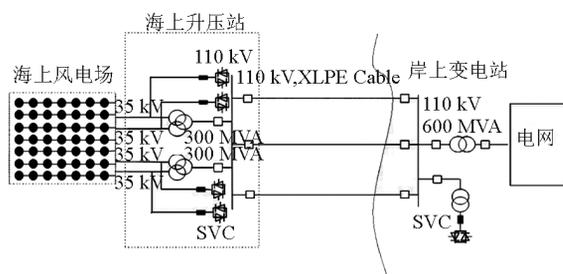


图 1 典型的高压交流输电系统

Fig. 1 A typical HVAC transmission system

2.2.1 XLPE 海底电缆和无功补偿设备

XLPE 交联聚乙烯电缆是目前应用最广泛的海底电缆, 其具有良好的导热性, 所以载流量和过短路电流能力都十分优秀。XLPE 电缆能在导体温度 90 °C 的条件下持续工作, 而且其介质损耗低于其他电缆, 并且对环境影响较小。如今额定电压 245 kV

[收稿日期] 2010-07-16

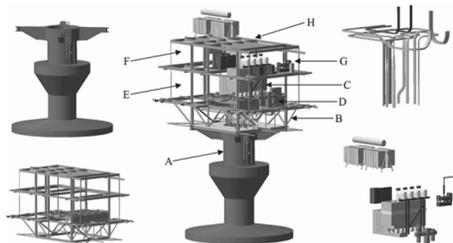
[基金项目] 国家自然科学基金创新研究群体资助(50921001)

[作者简介] 朱宜飞(1978—), 男, 湖北武汉市人, 长江勘测规划设计研究院工程师, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: zhuyifei@gmail.com

额定功率 500 MW 的 XLPE 电缆已投入使用,额定电压 500 kV 的 XLPE 电缆也即将面世。通常电缆线路的分布电容要远大于架空线路,因此在交流输电系统中会产生很大的电容电流,从而显著降低了电缆输送有功的能力,因此需根据实际情况在电缆的一侧或两侧加装无功补偿装置,目前相控电抗器 (TCR) 设备的使用较为普遍。

2.2.2 海上升压站

为了降低线路损耗并提高输送能力,海上风电场通常会配置海上升压站,大规模的海上风电场会配置一个以上。图 2 为海上升压站示意图。



A—基础层到高压电缆层通道; B—电缆层;
C—主变压器室; D—132 kV GIS; E—33 kV 开关室;
F—维护人员休息室; G—90 kVA 备用电源和
电池室; H—顶甲板、变压器冷却和附件室

图 2 海上升压站

Fig. 2 Offshore substation

2.3 电网换相换流器的高压直流输电 (HVDC) 系统

基于电网换相换流器 (LCC) 的直流输电系统被广泛应用于陆上长距离输电和海底电缆等领域,技术较为成熟,但目前尚未被运用到海上风电领域。一个完整的基于 LCC 的直流输电系统 (见图 3) 应包含以下部分: a. 交流滤波器; b. 直流滤波器; c. 换流变压器; d. 晶闸管换流阀; e. 平波电抗器; f. 电容器组件; g. 直流电缆; h. 柴油机辅助动力系统。

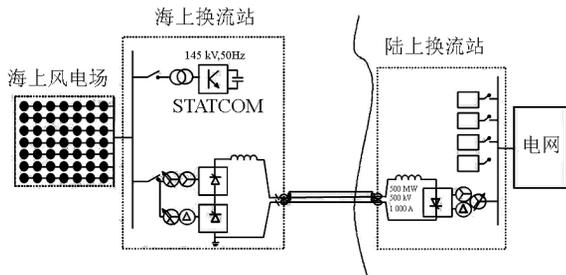


图 3 典型的基于电网换相换流器直流输电系统

Fig. 3 Typical HVDC transmission system based on LCC

1) 滤波器。交流滤波器用来吸收换流变压器所产生的谐波,减少谐波对交流系统的影响,同时向换流站提供无功;直流滤波器用于吸收直流侧的谐波。

2) 换流变压器。在 LCC 直流输电系统中,换流变压器成对配置,在海上和陆上的换流站中各装一台。

3) 晶闸管换流阀。晶闸管换流阀是换流站的核心部件之一,其控制交流与直流的相互转换,如今的可控硅器件额定可达 8 kV,容量高达 1 000 MW。

4) 平波电抗器。平波电抗器和直流滤波器一起构成直流侧的直流谐波滤波回路,一般串接在每个极换流器的直流输出端与直流线路之间,在抑制直流波动的同时还能保护换流阀。

5) 电容器组件。电容器组件是和电压器并联的一系列电容器组,用于提供换流阀工作时所需要的无功。

6) 直流电缆。直流电缆目前有充油电缆,不滴流电缆以及 XLPE 交联聚乙烯电缆等几种,其中充油电缆目前能做到 600 kV,额定容量高达 1 000 MW,但由于被充油所限,其长度很难超过 100 km,且存在绝缘油外泄污染环境的危险;不滴流电缆则能做到 500 kV,容量 800 MW,其容量主要受导体温度限制。

7) 柴油机辅助动力系统。该系统用于在换流站启动时向换流阀供电,并提供保护,冷却等设备所需的电源。

2.4 基于电压源的直流输电系统

基于电压源换流器 (VSC) 的直流输电系统是近年来在 IGBT 的基础上所发展出来的一种新兴直流输电系统 (见图 4),其主要组成部分为: a. VSC 换流站; b. 直流电缆。

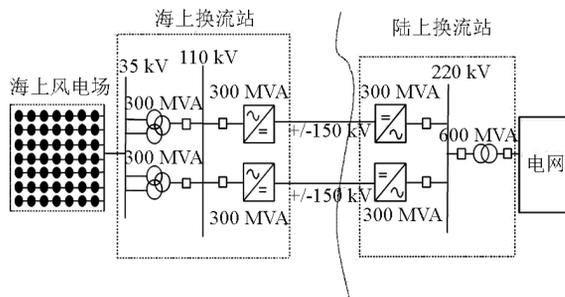


图 4 典型的基于电压源换流器的直流输电系统

Fig. 4 Typical HVDC transmission system based on VSC

1) VSC 换流站。VSC 换流站的核心是高频 IGBT 开关器件,其工作在 500 Hz 到 2 000 Hz 之间,通过控制 PWM 脉冲,其输出电压可根据系统需要自动调节。IGBT 开关器件在换流器上的应用消减了系统谐波并改善了电能质量,但高频同时也带来较高的系统损耗。

2) 直流电缆。在 VSC 系统中目前主要使用的是聚合物挤包绝缘电缆,其相对充油电缆和滴流电缆有着较好的导热性,对环境影响也较小。

3 输电系统的损耗分析

3.1 系统的简化和抽象

为了比较不同输电系统的损耗,必须考虑风电场的年度发电量,其由风速的分布函数决定。在此假设风电场的年发电量满足瑞利分布函数曲线,年平均风速为 8.5 m/s,并简化为 18 点采样,由此得到的年利用小时数为 3 450 h。

所有的 AC,DC 电缆均假设为 1 200 mm² XLPE 三芯电缆,并取其相应参数。各级变压器的损耗假设为定值。换流器均假设为中性点钳位三电平(NPC)换流器,其满负荷效率大于 98 %。

3.2 高压交流输电系统的损耗

高压交流输电系统的传输距离主要取决于电缆所产生的无功,比较其在不同电压等级下的传输容量和传输距离的关系(见图 5),其中边界条件按降压 10 %,相位变化小于 30°校验。

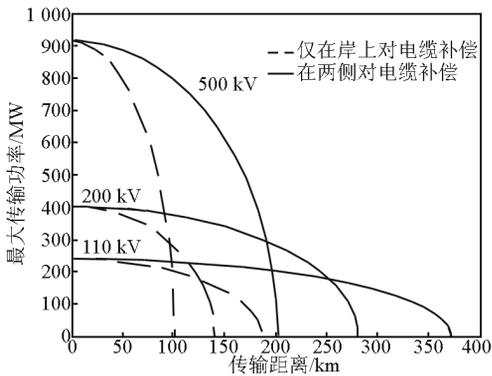


图 5 不同电压等级下的最大传输容量

Fig. 5 Transmission capacity for different voltage levels

由图 5 可知 110 kV: $L_{max} = 377$ km, 220 kV: $L_{max} = 281$ km, 500 kV: $L_{max} = 201$ km。

通过 Matlab 建立模型进行仿真,计算在不同电压等级下(110 kV、220 kV、500 kV)装机容量为 500 MW 和 1 000 MW 的风电场在不同距离上的系统损耗 L %。

$$L \% = \frac{\sum_i^n P_{li}}{\sum_i^n P_{gi}}$$

其中, P_{li} 为传输系统在风速 i 时的有功损耗; P_{gi} 为机组在风速 i 时所发出的有功功率; n 为风速的等级划分。

对于装机容量为 500 MW 风电场,传输系统损耗计算结果如表 1 所示。

表 1 500 MW 风电场高压交流输电系统损耗计算结果

Table 1 Transmission losses of 500 MW capacity with HVAC transmission system

电缆长度 / km	110 kV (3 根并联)	220 kV (2 根并联)	500 kV(单根)
50	2.91 %	1.65 %	1.03 %
100	4.83 %	3.13 %	2.57 %
150	7.55 %	5.07 %	4.72 %
200	11.34 %	7.81 %	19.16 %

对于装机容量为 1 000 MW 风电场,传输系统损耗计算结果如表 2 所示。

表 2 1 000 MW 风电场高压交流输电系统损耗计算结果

Table 2 Transmission losses of 1 000 MW capacity with HVAC transmission system

电缆长度 / km	110 kV (3 根并联)	220 kV (2 根并联)	500 kV(单根)
50	3.27 %	2.00 %	1.05 %
100	5.81 %	3.75 %	2.36 %
150	8.71 %	5.85 %	4.32 %
200	12.38 %	7.66 %	16.85 %

从上述结果可知,在 150 km 以内,采用较高的电压等级(220 kV、500 kV)可减少传输系统损耗,但其大规模应用尚未开始,还处于测试阶段;而对于较为成熟 110 kV 电压等级的其传输损耗的组成见表 3。

表 3 距岸 100 km 的 500 MW 的风电场传输系统损耗分布

Table 3 Losses component of 500 MW capacity at 100 km distance

	升压变压器 / %	无功补偿装置 / %	海底电缆 / %
传输损耗	5	4	91

3.3 基于 LCC 的直流输电系统损耗

通过 Matlab 建立模型进行仿真,计算在不同的换流器配置下,装机容量为 500 MW 和 1 000 MW 的风电场在不同距离上的系统损耗 L %。

对于装机容量为 500 MW 风电场,传输系统损耗计算结果如表 4 所示。

表 4 500 MW 基于 LCC 的直流输电系统损耗计算结果

Table 4 Transmission losses of 500 MW capacity with HVDC transmission system based on LCC

电缆长度 / km	500 MVA	2 × 250 MVA	600 MVA
50	1.77 %	1.81 %	1.75 %
100	1.98 %	2.14 %	1.87 %
150	2.19 %	2.48 %	1.99 %
200	2.39 %	2.82 %	2.11 %

对于装机容量为 1 000 MW 风电场,传输系统损耗计算结果如表 5 所示。

表 5 1 000 MW 基于 LCC 的直流输电系统损耗计算结果

Table 5 Transmission losses of 1 000 MW capacity with HVDC transmission system based on LCC

电缆长度/km	2 × 500 MVA	500 MVA + 600 MVA	2 × 600 MVA
50	1.69 %	1.66 %	1.65 %
100	1.92 %	1.84 %	1.78 %
150	2.14 %	2.01 %	1.91 %
200	2.37 %	2.19 %	2.04 %

不同组合条件下的传输损耗组成见表 6。

表 6 不同组合条件下的传输损耗组成

Table 6 Losses component at different condition

装机容量/MW	线路长度/km	线路损耗/%	换流器损耗/%
500	100	13	87
500	200	23	77
1 000	100	20	80
1 000	200	25	75

3.4 基于 VSC 的直流输电系统损耗

通过 Matlab 建立模型进行仿真,计算在不同的换流器配置下,装机容量为 500 MW 和 1 000 MW 的风电场在不同距离上的系统损耗 L %。

对于装机容量为 500 MW 风电场,传输系统损耗计算结果如表 7 所示。

表 7 500 MW 基于 VSC 的直流输电系统损耗计算结果

Table 7 Transmission losses of 500 MW capacity with HVDC transmission system based on VSC

电缆长度/km	350 MVA + 220 MVA	2 × 350 MVA	500 MVA
50	4.05 %	4.31 %	4.43 %
100	4.43 %	4.58 %	4.87 %
150	4.82 %	4.94 %	5.31 %
200	5.20 %	5.30 %	5.75 %

对于装机容量为 1 000 MW 风电场,传输系统损耗计算结果如表 8 所示。

表 8 1 000 MW 基于 VSC 的直流输电系统损耗计算结果

Table 8 Transmission losses of 1 000 MW capacity with HVDC transmission system based on VSC

电缆长度/km	2 × 500 MVA	3 × 350 MVA
50	4.09 %	4.02 %
100	4.56 %	4.52 %
150	5.03 %	5.02 %
200	5.51 %	5.52 %

不同组合条件下的传输损耗组成见表 9。

表 9 不同组合条件下的传输损耗组成

Table 9 Losses component at different condition

装机容量/MW	线路长度/km	线路损耗/%	换流器损耗/%
500	100	18	82
500	200	30	70
1 000	100	23	77
1 000	200	30	70

4 不同形式输电系统的比较

综合以上数据比较分析可知(见图 6),在 100 km 以内,传统的高压交流输电系统损耗较低,输送容量较大,而且技术成熟可靠,造价相对较低,这也很好的解释了为什么目前已建的风电场全部使用高压交流输电系统的原因。

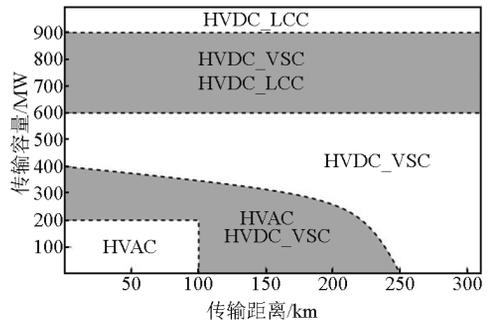


图 6 不同容量的海上风电场输电系统的选择

Fig. 6 Choice of transmission system for different wind farm capacities

当距离超过 100 km 时,交流输电系统的传输能力随着介质损耗的增加而快速下降,而直流输电系统因为其系统损耗和传输容量对于距离的增加并不敏感,优势逐渐显露出来,其中 LCC 的损耗要小于 VSC,但考虑到风力发电自身谐波含量较高,而 LCC 的工作原理会进一步加重谐波污染,对电网易造成较大冲击,所以 LCC 的应用范围应限于 VSC 容量所不及的超大规模风电场。

直流输电的另一个明显优势是与交流电网柔性连接,风电场与主网间互不影响,从而增强了系统的可靠性;而基于 VSC 的直流输电系统甚至可以连接在弱网上,是解决风电并网问题的关键之一。因此目前近岸海上风电场的输电系统可以以交流输电为主,随着 VSC 直流输电技术逐渐成熟,器件价格降低以后,再向其过渡。

(下转 97 页)