

江苏海上风电接入系统若干问题探讨

陆燕¹, 谈健²

(1.南京供电公司,江苏南京 210019;2.江苏省电力公司经济技术研究院,江苏南京 210008)

摘要:结合江苏近阶段开发建设的海上风电场项目,介绍了海上风电接入系统并网的电压等级、并网回路数的选择原则,讨论了长距离海缆并网的大型海上风电场输电系统的无功平衡、内部过电压限制措施,并通过工程实例,探讨了一种解决大型海上风电场接入系统后引起电网电压波动的无功补偿配置容量计算原则及方法。

关键词:海上风电;并网电压等级;高压海缆;无功平衡;内部过电压;无功补偿容量

中图分类号: TM614

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)05-0055-04

江苏是我国经济发达地区之一,又是一次能源匮乏的地区,全省有 954 km 的海岸线及广阔的近海海域,海上风资源丰富,电网完备,具有开发利用海上风电非常好的条件。结合近期开发建设的海上风电场项目规划及工程实例,对海上风电接入系统的电压等级、并网回路数的选择原则,以及离岸距离较远的大容量海上风电场并网输电系统的无功平衡、内部过电压的限制措施等问题进行了探讨。

1 接入系统的电压等级及并网回路数

江苏电网确定了江苏沿海地区风电将按“分层分片、近期就近分散、远期相对集中”的原则,根据电网结构、主干电网输电能力及地区电网负荷特性,因地制宜地接入系统。分散接入的风电场容量应与电网规划的分区分片格局合理匹配;远期大容量的风电通过开闭站汇流后接入 500 kV 电网,在全省范围内消纳。

按照现阶段江苏沿海地区风电场,电网电力电量平衡情况,考虑地区电网电压、潮流控制等因素,装机容量小于等于 100 MW、离岸距离较近小于 10 km 的海上(潮汐带)风电场,一般建议可采用 110 kV 电压等级直接接入地区电网;装机容量大于 100 MW、离岸距离大于 10 km 的海上(潮汐带)风电场,原则上均宜采用 220 kV 电压等级接入系统。

由于风电的随机性,系统对风电的可靠性没有很高的要求,即使是远距离的大型海上风电场均宜以一回高压交流输电并网线路接入系统^[1,2]。对规模相对较小的分散在附近不同海域的海上风电,宜按照“打包开发,规模并网”的原则,统筹考虑,分期规划开发,将附近海域的若干个风电场打包汇流后,以 220 kV 电压等级一回并网线路接入系统。

目前江苏将要开发建设的海上风电项目规划建设容量均为 200~300 MW,风电场的离岸距离大致在 20~60 km 之间,根据沿海地区电网结构、电力平

衡以及潮流分析,均宜以 220 kV 电压等级一回线接入系统。风电场在海上建设 220 kV 升压站,采用一回 220 kV 交流海底电缆接至岸边陆地滩涂的海缆登陆点,再根据周边地理位置、电网并网资源等情况,因地制宜采用 220kV 架空线接入系统。

2 无功功率平衡

海上风电的集电、输电一般均采用充电功率较大的交流海底电缆,会对并网电压带来较大影响。由于风电的随机性,为使风电运行时对电网电压影响最小,最佳的无功平衡补偿方式应为风电场并网线路与电网公共连接点不发生无功交换,即风电场送出线路注入电网公共连接点的功率因数为 1。大型海上风电的无功平衡大致可分为风电场内部 35 kV(电压)层及送出输电系统 220 kV(电压)层 2 个层面。

2.1 风电场 35 kV 层的无功平衡

35 kV 层无功平衡涉及的电气设备主要有 35 kV 集电海缆、风电机组无功调节容量(暂设定风机功率因数为 1)、风机端升压变压器。

以装设 100 台 3.0 MW 风电机组、额定容量为 300 MW 的海上风电场为例,一般需布置 12~15 回 35 kV 集电海缆线路,每回集电线路不同段长的 35 kV 海缆,根据风电机组布置的位置、汇集风电机组的多少,采用 70~300 mm² 不同截面型号的 35 kV 海底电缆,整个风电场 35 kV 集电海缆总计长度约为 140~150 km。

经初步估算,计及每台风电机组机端升压设备的感性无功损耗,风电场内部 35 kV 层的无功功率大致在风电场额定出力的 50%~60%时,35 kV 集电海缆的容性充电无功可以在 35 kV 层消纳平衡;当风电场出力小于额定出力的 50%时,35 kV 集电海缆容性充电功率将大于感性无功功率损耗,风电场需通过调节(或设置)风电机组的功率因数以及在升压站 35 kV 母线侧集中加装适当容量的动态无功补偿装置来调节控制 35 kV(电压)层的无功、电压。

2.2 220 kV 层的无功平衡

涉及 220 kV 层无功平衡的电气设备主要有海上变电站的升压主变压器和 220 kV 高压交流海缆。

由于高压海缆较大的容性充电功率,当海上风电场离岸距离超过 20 km 或更远时,即使在系统正常运行方式下,海缆送端、风电场海上升压站并网点的电压可能会超过其额定电压的 10%,致使风电场无法正常并网运行;另外,长距离高压交流海缆的电容效应还会因风电场并网输电系统的断路器操作或系统故障产生内部过电压,将严重影响系统及风电场运行安全。因此,离岸距离较远的风电场 220 kV 层应在并网海缆线路侧配置足够容量的感性无功补偿装置,以满足 220 kV 层无功平衡的需要。海缆线路侧加装 220 kV 高压并联电抗器,不仅可以补偿、平衡海缆的容性充电无功,而且还是补偿海缆电容效应、限制系统内部过电压的有效措施。因此,通过较长距离高压交流海缆线路并网的海上风电场,220 kV 层无功补偿宜采用 220 kV 高压并联电抗器(以下简称高抗)。

为了避开输电线非全相运行谐振区,高抗补偿容量一般不宜大于 80% 补偿度(并联电抗器的容量与空载海缆线路电容无功功率之比)。综合平衡输电系统的无功损耗、风电机组无功调节能力以及 35 kV 母线需加装动态无功补偿容量,通常在 220 kV 海缆侧加装 60%~70% 补偿度的高抗容量,可以满足 220 kV 电压层无功平衡需求。

3 内部过电压

运行方式改变、断路器操作或系统故障,导致风电场和接入系统电气参数变化时,可能产生工频过电压、操作过电压等内部过电压情况,需采取相应措施^[3,4]。

3.1 工频过电压

工频过电压和系统运行方式有关,风电场容量愈大,工频过电压值愈小;风电场容量愈小,即内电抗 X_G 越大,末端电压升高越严重。因此,在估算最严重的工频过电压时,应以风电场可能出现的正常最小的运行方式为依据,并考虑海上升压站主变压器 $N-1$ 运行方式。根据 DL/T 620-1997^[5] 规定,对 220 kV 系统工频过电压的限值一般不应超过 1.3 p.u.。

由于海上风电场风电机组的建设过渡期间并网运行方式与常规电源不同,因此海上风电场限制系统过电压需配置的高抗容量应以风电场建设最终规模时正常并网运行方式为依据;过渡期间并网运行时可采取临时的限制措施(例如在需保护点加装金属氧化物避雷器等措施)。工频过电压的值与故障形式、发生故障的位置以及风电场运行方式、功率突变量大小等有关,在海上风电场接入系统方案估算时要充分考虑这些因

素,特别是风电场不同运行方式(风电场出力及风电机组功率因数)对工频过电压值的影响。

对于离岸距离较远的大中型海上风电场,以一回 220 kV 高压交流海缆并网接入江苏电网的并网方式,相当于单电源、单回线接入强电网的网络结构。经初步计算分析,这种接入方式下,工频过电压的最大值一般出现在海上风电场并网输电线的受端线路侧发生单相接地故障、三相断开时的健全相中。在并网线路侧配置适当容量的高抗,补偿平衡海缆充电无功的同时可有效地将工频过电压升高限制在容许的限度之内,而限制工频过电压需配置高抗容量的多少与高抗装设在并网输电线路送、受端的位置关系不大。

3.2 操作过电压

由于海缆的电容效应,当海上风电场并网输电线路的开关设备在 220 kV 长距离海缆线路发生无故障三相跳闸、单相接地故障跳闸等各种运行方式的操作过程中,特别是切空载 220 kV 长距离海缆线路时,断路器触头间电弧会重燃,重燃间系统将会产生强烈电磁振荡并进而有可能产生较高的过电压,在电缆与架空线混合线路尤其严重。根据文献^[5] 规定,对 220 kV 系统的操作过电压的限值一般不应超过 3.0 p.u.。

为防止长距离 220 kV 海缆线路产生的操作过电压超规定的限值,风电场送出线路可选用灭弧性能优的高性能断路器,在断路器断口加装并联电阻,以及在需要的保护点安装金属氧化物避雷器外,在海缆线路侧加装高抗也是限制操作过电压的有效措施。

具体的高抗装设容量应在海上风电场工程的 220 kV 海缆实际长度、型号参数、敷设方案确定后,结合限制工频过电压及 220 kV(电压)层无功平衡需要综合平衡来确定。

4 海上风电场的无功配置

大型海上风电场的无功容量包括两部分:风电场的无功电源容量以及长距离海缆并网输电系统配置的高抗容量。

风电场的无功电源容量包括风电机组及风电场升压站 35 kV 母线配置的动态无功补偿容量^[1,2]。现阶段国内海上风电场选用的主流风电机组机型大致为双馈式异步风力发电机组和永磁直驱风力发电机组 2 种类型。其额定功率因数为 1.0,在配置相应的无功电压调节控制软硬件设备后,风机具备功率因数在 +0.95~ -0.95 间动态连续调节的能力,可一定程度上实现对风电机组无功和电压的调节控制。

当海上风电场仅靠风电机组的无功容量和调节能力无法满足电网运行要求时,应考虑集中加装适当容量可动态连续调节的无功补偿装置^[1,2]。海上风电场的

无功可调容量及电压控制能力应由风电场风电机组及动态无功补偿装置共同提供。

4.1 海上风电场无功补偿装置容量的确定

以某一计划建设的海上风电场为案例,探讨一种解决大型海上风电场接入电网后引起电压波动并在电网高峰低谷时段,按电网需要送出或吸收一定容量无功,起到对电网电压调节作用的无功补偿容量的计算原则及方法。

4.1.1 计算原则

(1) 按照无功容量分(电压)层、分(供电)区基本平衡的原则,海上风电场配置的无功补偿装置包括220 kV海缆线路侧需装设的高抗容量以及海上升压站35 kV汇流母线侧动态无功补偿容量。

(2) 考虑电网规划年度负荷水平、网络结构的不确定性,为使风电场具备一定的无功电压调节能力,在确定需装设的动态无功容量时,宜以其并网输电线注入电网公共连接点潮流的功率因数在 ± 0.98 范围调节能力为标准进行估算。

(3) 配置的动态无功补偿装置容量应能满足海上风电场各种随机运行方式的电网调控要求,在容量估算时可选用海上风电场额定发电出力的100%,50%,10%几种典型运行方式。

(4) 针对风电机组不同的无功调节能力,在配置动态无功补偿容量估算时,可按以下2种方式设置:①风电场的无功功率出力根据运行初始条件设定风电机组运行的功率因数;②风电机组运行的功率因数可在一定范围内连续可调。

4.2 案例说明

某海上风电场共安装100台单机容量为3.0 MW的风电机组装机,距海岸约56 km。风电场通过220 kV电压等级接入电网,其中架空线导线型号选用LGJ-2×630、长度为6 km,陆缆截面选用1000 mm²、长度为15 km,海缆截面选用800 mm²、长度为56 km,风电场接入电网示意图如图1所示,相关数据见表1。

(1) 风电场内部35 kV层无功平衡,选择风机初始运行功率因数。在风电场满发的运行方式下,风电场35 kV集电海缆充电功率远远小于中心升压站主变、集电海缆及机端升压变的无功损耗,因此风机功率因数通常可在+0.95~1之间选择,不同的风机功率因数、风电场升压站主变高压侧功率因数计算结果见表2。

由表2计算结果可知,当风机功率因数设定为0.98时,风电场内部无功发生量与损耗基本平衡。

(2) 风电场并网输电线220 kV层无功平衡以及限制工频过电压的需要,选择高抗容量。由于该工程并网输电线电缆长约70 km,220 kV电压层无功平衡的需要,高抗补偿容量不宜小于60%。

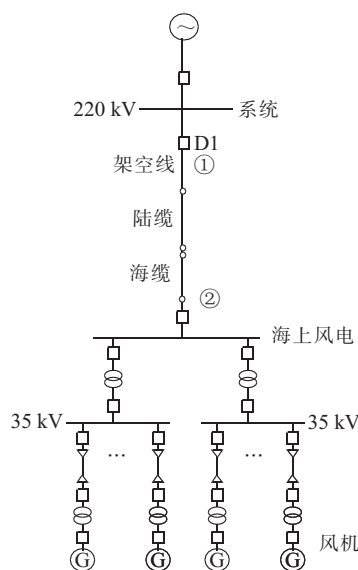


图1 风电场接入电网示意图

表1 示例计算参数

序号	名称	参数
1	风电场总容量	300 MW
2	风电场出现概率较大出力	180 MW
3	单台风机容量	3.0 MW
4	风电机组额定功率因数	1
5	风电机组功率因数调节范围	0.95~-0.95
6	220 kV主变2台	2×150 MV·A
7	220 kV主变电压等级	220/35 kV
8	220 kV主变短路阻抗	14%
9	35 kV机端升压变100台	100×3.3 MV·A
10	35 kV机端升压变短路阻抗	7%
11	35 kV机端变电压	35/0.69 kV
12	35 kV集电回路数	13回
13	每回集电回路风机台数	8~9台
14	35 kV海缆,截面70 mm ²	56.5 km
15	35 kV海缆,截面120 mm ²	9.3 km
16	35 kV海缆,截面150 mm ²	7.5 km
17	35 kV海缆,截面185 mm ²	8.5 km
18	35 kV海缆,截面240 mm ²	48.2 km
19	35 kV海缆,截面300 mm ²	9.5 km

表2 风电场主变高压侧功率因数计算结果

序号	风机功率因数	主变高压侧功率因数
1	0.95	0.982
2	0.98	0.999
3	1	-0.982

在风电场满发的运行方式下,装设不同容量的高压并联电抗器、风电场送出线路电网侧功率因数计算结果见表3。由表3可知,在装设130~145 Mvar的高压并联电抗器后,风电场送出线路电网侧功率因数接近1。为避免非全相状态下的谐振区,高压并联电抗器容量可选择130 Mvar。经工频过电压计算,并网输电线

配置 130 Mvar 高抗, 已能满足风电场不同运行方式下, 送出输电线各种故障方式限制工频过电压的要求。

表 3 风电场送出线电网侧功率因数计算结果

序号	高压并联电抗器		风电场送出线电网侧的功率因数
	补偿度 / %	容量 / Mvar	
1	80	145	-0.998
2	70	130	0.998
3	60	110	0.987

注: 风电场送出线路充电功率约为 183 Mvar。

(3) 风电场动态无功补偿容量的确定。风电场应具备的无功调节能力, 按照上述(2)风电场送出线路电网侧功率因数+0.98(高峰)~-0.98(低谷)来要求。风机不具备功率因数动态连续调节能力时, 功率因数设定为 0.98, 相关计算结果见表 4。风机具备功率因数动态连续调节能力时, 相关计算结果见表 5。

表 4 动态无功补偿容量计算

运行方式	风电场出力 / %	动态无功补偿容量 / Mvar
高峰	100	-29.4
	50	30.9
	10	54.9
低谷	100	78.6
	50	87.7
	10	69.1

表 5 功率因数可动态调节时动态无功补偿容量计算

运行方式	风电场出力 / %	风机功率因数	动态无功补偿容量 / Mvar
高峰	100	+0.971	-29.4
	50	-0.988	30.9
	10	-0.95	54.9
低谷	100	0.993	78.6
	50	-0.95	87.7
	10	-0.95	69.1

由表 4 计算结果可知, 若风机不具备功率因数动态连续调节能力, 风电场 35 kV 母线侧所需的动态无

功补偿装置容量为-30 Mvar(容性)~90 Mvar(感性)。由表 5 计算结果可知, 若风机具备功率因数在+0.95~-0.95 范围内动态连续可调, 风电场 35 kV 母线侧所需的动态无功补偿装置容量为 0~60 Mvar(感性)。

5 结束语

近阶段, 江苏开发建设的海上风电场离岸距离较近容量较小, 因此结构简单、技术成熟、经济性优的高压交流输电并网方式仍然是接入系统的首选。下阶段江苏将进入海上风电规模化发展阶段, 风电场容量和离岸距离将进一步增加, 而高压交流海缆电容效应对交流输电距离和输送容量的限制将更为明显, 成为大容量、远距离海上风电并网的技术瓶颈。柔性直流输电技术可有效解决远距离、大容量海上风电并网技术要求, 随着其技术的不断成熟和推广应用, 工程造价也将逐步降低。未来, 柔性直流输电技术凭借优异的并网性能、合理的性价比, 将成为大容量、远距离海上风电并网方式的最佳选择。建议加强对柔性直流输电并网方式及其工程实践应用的研究, 为今后江苏特大型海上风电基地的建设创造更有利的条件。

参考文献:

- [1] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 国家电网公司. Q/GDW 392—2009 风电接入电网技术规定[S].
- [3] 张纬钺, 何金良, 高玉明, 等. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 173-177.
- [4] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 384-396.
- [5] 电力工业部. DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.

作者简介:

- 陆 燕(1977), 女, 江苏南通人, 工程师, 从事新能源接入系统、电网运行方式、经济调度工作;
谈 健(1974), 男, 江苏常州人, 高级工程师, 从事电力系统规划、新能源接入系统、电力市场分析预测工作。

A Discussion on the Integration of Offshore Wind Farm into Jiangsu Power Grid

LU Yan¹, TAN Jian²

(1. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: Combining with the last constructed offshore wind power farm in Jiangsu Province, the selecting principles of integrating voltage level and number of connecting circuits are introduced. The reactive power balance and the court-measures for inner over-voltage of large-scale wind farm connected to the power grid through a long distance transmission line are discussed. Based on an engineering project, a method for reactive compensation capacity calculation for large-scale offshore wind farm is proposed.

Key words: offshore wind farm; access voltage; HV submarine cable; reactive power balance; inner-overvoltage; reactive compensation capacity