

基于ETAP的海上风电场无功补偿配置研究

海上风电场由于远离陆地，大量使用海底电缆，其无功特性与陆上风电场存在较大差异，因此需要选择合适的无功补偿方式。基于ETAP软件对某海上风电场进行建模，通过分析其不同工况下的无功特性，提出在合适的地点选择补偿设备和补偿容量，计算结果对海上风电场无功补偿设计具有指导意义。

丁志勇/中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

0 引言

风力发电是我国发展最快的新能源，2015年我国风电累计装机容量145 362 MW，超过电力总装机容量的7%，是仅次于火电、水电的第三大电力来源。目前我国主要以陆上风电装机为主，但海上风电凭借其不占用土地资源及年用小时高的优势，将是未来发展趋势^[1]。我国已建成东海大桥一期100 MW、江苏如东150 MW海上风电场等示范工程^[2]。预计到2020年，我国海上风电装机容量将超5 GW。

由于风电具有波动性和间歇性，导致风电并网产生电能质量问题，如电压波动、闪变和谐波等。海上风电远离陆地，其集电系统内部以及至陆上变电站均通过海底电缆连接，充电电流比架空线路要大，因此无功特性较陆上升压站有较大不同，需在风电场内或并网点装设无功补偿装置^[3-4]，调整电压，改善无功特性，降低传输损耗。海上风电无功补偿作为业内热点问题，目前已有较多研究：文献[5]建立了海上风电场半聚合等效模型，研究利用SVC对风电场内部以及STATCOM对并网点故障暂态下的无功补偿，通过PSCAD/EMTDC软件仿真

实现；文献[6]利用Digsilent Powerfactory软件建立海上风电场输电系统模型，计算风电场在不同的容量、输电距离及补偿方式下的海底电缆电流分布，并对比单端和双端补偿对输出海缆的影响；文献[7]分析计算不同无功补偿方式下，空载线路的电容效应系数与无功补偿容量的关系，提出了根据相对电容效应系数来确定海缆无功补偿容量的方法；文献[8]提出了在海上升压站安装小容量和陆地上安装MCR的动态感性无功补偿方式。

综合分析已有的海上风电无功补偿研究及仿真，本文主要从工程实用设计角度出发，基于ETAP软件建立风电场等效模型，分析对比各种无功补偿装置特点，选取合适设备在不同点进行无功补偿并对比其效果，以获得有一般设计指导意义的无功补偿配置方式。

1 无功补偿计算

1.1 风电场主要设备无功功率

海上风电场需要补偿的无功功率主要取决于其内部所产生或消耗的无功，各主要设备特性如下。

(1) 变压器

变压器包括风机的箱式变压器和升压站的主变压器。空载及正常运行时均消耗无功功率，其无功损耗 Q_T 包括励磁无功损耗 ΔQ_0 和漏抗中的无功损耗 ΔQ_T ， Γ 形等效电路如图1所示。

不考虑 Γ 形等效电路中的电阻，变压器的无功损耗表达式为



丁志勇/工程师

关键词/Keywords

海上风电 ·
ETAP ·
无功补偿 ·
补偿容量 ·
补偿点 ·

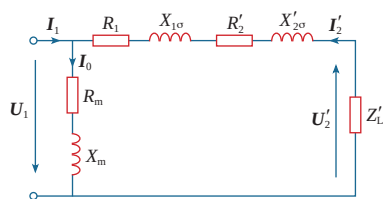


图1 变压器的T形等效电路

$$Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_T = \frac{U_1^2}{X_B} + \left(\frac{S}{U_1} \right)^2 X_T \approx \frac{I_0\%}{100} S_N + \left(\frac{S}{U_1} \right)^2 X_T \quad (1)$$

式中, $I_0\%$ 为空载电流百分比; U_1 为一次电压; X_B 为励磁电抗; S 为变压器传递的功率; X_T 为系统的短路阻抗。

(2) 传输线路

传输线路的单位距离等效模型如图2所示。

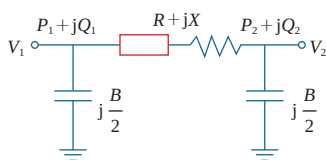


图2 单位距离传输线路的π形等效电路

单位线路上的无功损耗包括串联电抗和并联电纳中的无功损耗。由于传输线路上的电压都在额定电压附近波动,因此可假设传输线路运行在额定电压,即 $V_1 = V_2 = V$, 可得传输线路上的无功损耗为

$$Q_L + Q_B = \left(\frac{P_1^2 + Q_1^2}{V_N^2} X - V_N^2 B \right) L \quad (2)$$

式中, Q_L 为集电系统及高压海底电缆等效电抗产生的无功损耗; Q_B 为等效电纳所产生的无功损耗; B 为单位长度的等效电纳; X 为单位长度的等效电抗; $V_N^2 B$ 为单位传输线路的充电功率; L 为传输线路长度。

(3) 风机系统

每台风机可以在功率因数超前0.95~滞后0.95的范围内动态可调,因此整风电场风机系统的无功损耗为

$$-0.312P_{WFN} \leq Q_{WF} \leq +0.312P_{WFN} \quad (3)$$

式中, P_{WFN} 为风电场风机满发的额定功率。

1.2 风电场无功功率计算

在GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》^[9]中并未对风机的无功调节能力提出明确要求,因此按风机不参与无功调节去配置无功补偿装置的容量,由此可得风电场消耗的无功功率 Q 为

$$Q = Q_T + Q_L + Q_B \quad (4)$$

风电场消耗的无功功率主要取决于并网电压 U 和风电场有功出力 P_{WF} 。当 $P_{WF} = 0$ 、 $Q_{WF} = 0$ 及 $U = U_{max}$ 时,风电场无功损耗为 Q_{min} ,此时传输线路和变压器的无功损耗最小,风电场容性充电功率最大;当 $P_{WF} = P_{WFN}$ 、 $Q_{WF} = 0$ 及 $U = U_{min}$ 时,风电场无功损耗为 Q_{max} ,此时传输线路和变压器的无功损耗最大,风电场容性充电功率最小。无功设备配置的容量应能补偿风电场运行在 Q_{max} 与 Q_{min} 的状态。

1.3 无功补偿设备特性及配置原则

海上风电无功补偿的主要方式包括:①在海上升压站低压侧配置无功补偿装置;②在陆上集控中心配置无功补偿装置;③在海上升压站低压侧及陆上集控中心均配置无功补偿装置。无功补偿选取点如图3所示。

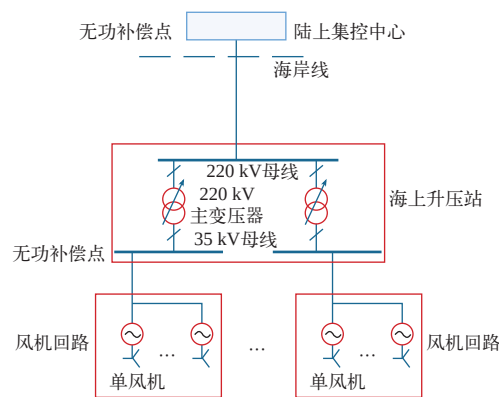


图3 无功补偿选取点

目前常用的无功补偿设备主要包括并联电容器/电抗器、SVG、SVC和有载调压无功补偿系统等,其设备特性如表1所示。

目前SVG产品技术日渐成熟,功率及电压等级提高,补偿特性正反连续可调,加上占地面积小的特点,使其成为近年海上风电无功补偿设备

表1 风电场无功补偿设备特性分析

补偿方式	并联电抗器/电容器	静止型动态无功发生器 (SVG)	TCR型高压动态无功补偿装置 (SVC)	有载调压式无功补偿系统
补偿效果	向系统输出无功，台阶式调节，过补或欠补	线性调节，输出或吸收无功功率	线性调节，向供电系统输出或吸收无功功率	向系统输出无功，台阶式调节，过补或欠补
改善电能质量	提高功率因数，无法抑制谐波	抑制电压波动，滤除谐波，提高功率因数	抑制电压波动，滤除谐波，提高功率因数，抑制负序电流	提高功率因数，无法抑制谐波
故障率	故障率低	有一定故障率、维护费用高	故障率低	临界点振荡频繁投切导致有载分接头故障率高
设备投资及维护投资	设备投资低，运行维护投资低	设备投资高，运行维护投资高	设备投资较高，运行维护投资较高	设备投资较低，运行维护投资高

的优先选择；但SVG目前价格较高且有一定的故障率，因此可配合并联电容器/电抗器进行补偿。

2 无功补偿案例分析

本文选取国内一个规划中的风电场进行建模分析，该风电场一期装机容量为300 MW，基本信息如下：

- 1) 布置75台4 MW风机，风机电压690 V，经箱式变压器升至35 kV。
- 2) 35 kV集电系统按风机分为12回路，每回路6~7台风机。
- 3) 各回路风机汇集于海上升压站4段35 kV母线，经两台180 000-220/35 kV主变压器升压至220 kV^[10]。
- 4) 海上升压站通过一回路27 km 高压海底电缆与陆上集控中心连接^[11]。

风电场建模采用ETAP软件^[12-13]，其单风机模型如图4所示。

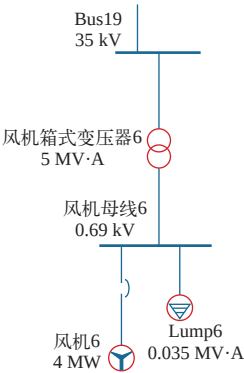


图4 单风机模型

单风机模型包括风力发电机、风机用电负荷及箱式变压器，6~7台风机串联组成一个35 kV回路。

设风机功率因数为1，陆上集控中心并网点电压在0.97~1.07(pu)范围内变化，风机出力由0至满发变化，可得风机及集电系统无功功率如表2所示，陆上集控中心母线无功功率如表3所示。

表2 风机及集电系统无功功率

风机出力 /MW	陆上集控中心220 kV母线电压(pu)			
	0.97	1.00	1.05	1.07
0	3.946	4.305	4.924	5.181
150	0.314	0.308	1.314	1.710
300	-14.431	-12.808	-10.385	-9.496

表3 陆上集控中心母线无功功率

风机出力 /MW	陆上集控中心220 kV母线电压(pu)			
	0.97	1.00	1.05	1.07
0	63.676	67.786	74.914	77.862
150	42.616	48.028	57.056	60.702
300	-27.62	-17.228	-1.153	4.939

由表2~表3可知，风电场无功功率 Q_{max} 与 Q_{min} 符合前文分析结果，根据无功配置原则，采取在海上升压站低压侧配置并联电抗器、在陆上集控中心配置SVG+并联电抗器的补偿方式，补偿容量计算如下：

- 1) 当母线电压=0.97 (pu)、风机出力=300 MW时，集电系统无功损耗最大，输出的无功功率为-14.431 Mvar，但由于高压海底电缆充电功率能补偿

该部分无功损耗，因此不需要考虑补偿；当母线电压=1.07（pu）、风机出力=0 MW时，集电系统无功损耗最小，35 kV电缆充电功率最大为5.181 Mvar，需在海上升压站低压侧配置5.181 Mvar并联电抗器进行补偿。

2) 当母线电压=0.97（pu）、风机出力=300 MW时，陆上220 kV并网点无功损耗最大，输出的无功功率为（-27.62-5.181）Mvar=-

32.801 Mvar；当母线电压=1.07（pu）、风机出力=0 MW，输出无功功率为（77.862-5.181）Mvar=72.681 Mvar。

陆上升压站需要配置的SVG容量为±[72.681-（-32.801）] Mvar/2=±52.741 Mvar，需要配置的并联电抗器容量为（72.681-52.741）Mvar=19.94 Mvar。

补偿后风电场在各工况下无功特性如表4所示。

表4 补偿后风电场并网点无功特性

(单位: Mvar)			
合计	电抗器+SVG无功输出最小值		电抗器+SVG无功输出最大值
	-5.181-19.94-52.741=-77.862		-5.181-19.94+52.741=27.62
风电场无功输出最小值	-27.62	-	27.62-27.62=0
风电场无功输出最大值	77.862	-77.862+77.862=0	-

由表4可得配置无功补偿装置后，风电场工作在无功输出最大和最小的工况下，均能控制陆上并网点无功输出为0。

3 结束语

本文介绍了一种基于ETAP软件建模的海上风电场无功补偿配置方法，通过计算表明，在海上升压站配置并联电抗器、陆上集控中心配置并联电抗器+SVG，能满足风电场各种工况下无功特性的补偿要求，对一般海上风电场的无功补偿装置选取及容量计算具有指导意义。

参考文献

[1] 黄玲玲,符杨,郭晓明.大型海上风电场电气接线方案优化研究[J].电网技术,2008,32(8):77-81.

[2] 王爽,高长征.交流并网海上风电场无功配置原则研究[J].东北电力技术,2016,37(4):42-45.

[3] 汪宁渤.大规模风电送出与消纳[M].北京:中国电力出版社,2012.

[4] 章正国,郁单,徐英,等.大长度高电压海底电缆的无功补偿设计研究[J].电力电容器与无功补偿,2010(6):32-38.

[5] 赵发坤.基于PSCAD/EMTDC的海上风电场等效模型与无功补偿研究[D].杭州:浙江大学,

2014.

[6] 鲁加明,赵云,郑明,等.无功配置对海上风电场输出海缆损耗的影响分析[J].电力建设,2015,36(6):114-118.

[7] 查国强,袁越,傅质馨,等.考虑海底电缆充电功率的风电场无功补偿[J].电网与清洁能源,2013,29(2):54-60.

[8] 熊信恒,陈柏超,袁佳歆.考虑海底电缆的海上风电场动态感性无功补偿[J].武汉大学学报,2016,49(4):591-596.

[9] GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S].

[10] 郑明.300 MW海上风电场电气主接线设计[J].南方能源建设,2015,2(3):62-66.

[11] 朱宜飞,陶铁玲.大规模海上风电场输电方式探讨[J].中国工程科学,2010,12(11):89-92,97.

[12] 吴尚志.基于ETAP软件进行风场短路电流计算及无功补偿分析[J].电气应用,2012,31(8):95-100.

[13] 葛江北,周明,李庚银.大型风电场建模综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(17):146-153.

(收稿日期:2016-11-13) EA