

考虑谐波谐振和电压稳定的海上风电场无功优化配置方法

杜婉琳*, 梅桂华, 马明, 王玲

(广东省电力装备可靠性企业重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广东省广州市 510080)

Reactive Power Configuration Method of Offshore Wind Farm Considering over Voltage and Harmonic Resonance

DU Wanlin*, MEI Guihua, MA Ming, WANG Ling

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510080, China)

Abstract: Offshore wind farm power is accessed to the power grid through the long-distance AC submarine cable, easily causing the power frequency over voltage due to the serious capacitance rise phenomenon. Simultaneously, the power electronic devices and the line capacitance also severely affect the power quality of the grid. Therefore, the over voltage and the harmonic resonance should be fully considered in reactive power compensation. In view of this problem, this paper analyzes the resonance characteristics of the offshore wind farm by establishing the harmonic model and sweeping the harmonic modal impedance. Furthermore, it studies the reactive power features and calculates the reactive power deficit of the wind farm under various power generation output levels and grid entry point voltages. Afterwards, aims to reduce the overall cost, the paper optimizes the reactive power compensation of the offshore wind farm under constraints of voltage stability margin, minimum compensation capacity, harmonic resonance and over voltage. Finally, the Matlab/Simulink simulation results show that this proposed method is effective.

Keywords: offshore wind farm; doubly fed induction generator (DFIG); voltage control; harmonic resonance

摘要: 海上风电经长距离高压交流海底电缆接入电网, 海底电缆容升效应显著, 容易引起工频过电压, 同时电力电子器件和线路电容引起的谐波谐振问题也严重影响着电网电能质量, 因此进行海上风电场无功配置时应充分考虑过电压和谐波谐振问题。针对上述问题, 建立了海上风电场谐波模型, 对海上风电场的谐波模态阻抗进行扫描, 继而分析海上风电场的谐振特性; 然后研究了海上风电场无功特性, 计算

各种发电出力水平和并网点电压下的风电场无功缺额; 接着以降低综合成本为目标, 以静态电压稳定裕度、最小补偿容量、谐波谐振及过电压为约束, 进行海上风电场无功优化配置; 最后通过Matlab/Simulink仿真验证所提方法的有效性。

关键词: 海上风电场; 双馈风力发电机组; 电压控制; 谐波谐振

0 引言

为达到“碳达峰、碳中和”的目标, 需要构建以新能源为主体的新型电力系统, 推动新能源大力发展^[1-2]。海上风电作为可再生能源之一, 因其发电效率高、不占用土地、对环境影响相对较小等优势, 适合大规模开发, 具有广阔发展前景, 在近些年也得到迅速发展^[3-6]。风速的间歇性、随机性和不可控性, 使风电场输出功率不稳定, 随风速波动变化, 当大规模风电并网时, 势必会对系统造成扰动, 影响系统的安全稳定运行^[7]。风电场在输送有功功率的同时会向系统吸收或输入无功功率, 无功流动会产生电压偏移, 增加电网损耗, 严重时将导致系统崩溃和风机跳闸^[8]。国家标准GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》对风电场无功电源和风电场电压控制都作了要求, 无功电源的要求中规定风电场要充分利用风电机组的无功容量及其调节能力, 必要时加装无功补偿装置, 甚至动态无功补偿装置; 标准规定风电场需要配置无功电压控制系统, 能够进行无功功率调节和电压控制。因此, 无功优化配置和协调控制问题是海上风电场并网的关键技术难题之一^[9]。

目前, 海上风电场多采用高压交流海底电缆汇集

基金项目: 广东电网有限责任公司科技资助项目(GDKJXM 20193404)。

Science and Technology Program of Guangdong Power Grid Co., Ltd.(No. GDKJXM20193404).

风电, 并经升压后远距离输送至陆上集控站。由于海底电缆的电容远高于架空线路, 其容升效应容易引起工频过电压, 导致部分母线电压超标等问题。此外, 随着海上风电的有序建设, 风电机组变流器、无功补偿装置等电力电子器件和线路电容引起的谐波谐振问题也逐渐凸显^[10-11], 影响电网电能质量, 严重时还可能导致风电机组脱网和风电场设备损坏^[12-15]。为抑制风电场逆变器工作时产生的谐波, 通常在并网逆变器与电网之间加入滤波器, L型滤波器因具有较强的高频抑制能力而被广泛使用^[16-17], 但L型滤波器的高阶特性使得多逆变器并网时系统存在多个谐振点, 也降低了电网电能质量水平。海上风电场的谐波谐振问题已成为当前研究热点问题之一, 因此, 在对海上风电场进行无功配置过程中应充分考虑过电压和谐波谐振问题。相关文献主要聚焦于静态优化算法和无功控制策略, 通过计算海底电缆容性无功功率确定高压并联电抗器容量, 利用动态无功补偿装置补偿由风速变化造成的无功波动, 还根据不同优化目标对无功资源进行协调控制, 以满足运行过程中无功就地平衡、工频过电压控制以及电压控制要求, 但未考虑谐波谐振问题, 尚需进一步研究^[18-20]。文献[21]基于双馈风力发电机组建立了随风速变化的动态谐波模型, 并利用频率扫描法对公共耦合点谐振问题进行仿真分析, 计算风电场各参数的敏感度指标用以评价各参数对谐振的影响程度。文献[22]建立并网LCL逆变器和电网等效模型, 采用模态分析法分析风电场并网谐振现象并给出各节点谐振参与因子、谐振中心等谐振信息, 研究随着风电场集电线路长度和风机并网台数改变时的并网谐振各节点参与因子与谐振中心的变化规律。文献[23]对海缆无功补偿容量、分组方案和补偿效果进行了经济技术分析, 以成本和网损费用最小为目标给出无功规划模型, 在海上升压站低压侧和陆上集控中心分别配备无功补偿装置, 并寻找最优无功补偿配置方案; 但是没有针对工频过电压进行优化分析, 也未考虑谐波谐振影响。文献[24]分析了海上风电机组的无功功率极限, 计算了海上风电经电缆送出系统的无功/电压数值关系, 从降低海上风电工程建设造价和充分发挥海上风电场参与电网无功控制能力的角度设计了综合利用风电机组无功输出能力和电网侧高抗的配置方案, 但该文在无功配置过程中也未考虑谐波谐振问题。

基于上述问题, 本文提出了考虑谐波谐振和电压稳定的海上风电场无功优化配置方法, 首先建立了海

上风电场的谐波谐振模型, 通过频率扫描法对不同工况下的谐波阻抗进行扫描, 分析海上风电场的谐振特性, 建立用于无功配置的谐波谐振约束; 其次研究了海上风电场无功特性, 对不同工况下海上风电场的工频过电压进行计算, 建立用于无功配置的过电压约束; 最后充分考虑风电机组自身的无功调节能力, 以降低综合成本为目标, 以静态电压稳定裕度、最小补偿容量、谐波谐振及过电压为约束, 对无功补偿装置容量进行优化配置。

1 海上风电场谐波特性及谐波谐振约束

图1为海上风电场结构图, 海上风电场风力发电机所发电能通过风机经35 kV集电网络汇集到海上升压站, 经升压变压器可将电压升至110 kV或220 kV, 升压后经高压海底电缆输送至陆上集控中心, 再经过架空线路接入电网。由于海底电缆对地电纳较大, 线路充电功率显著增加, 导致系统电压波动严重, 为进行电压控制, 海上风电场通常设置离散无功补偿装置和动态无功补偿装置。

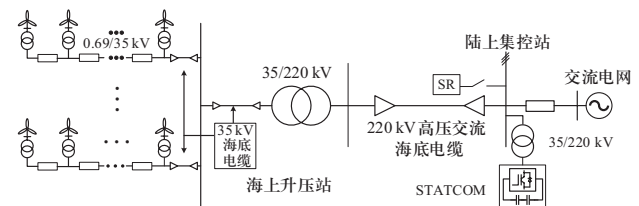


图1 海上风电场结构图

Fig. 1 Structure diagram of offshore wind farm

本文所采用的风机类型为双馈式风力发电机组, 离散无功补偿装置为高压并联电抗器 (SR), 动态无功补偿装置为STATCOM, 在充分考虑系统谐波谐振问题和电压稳定的基础上, 进行海上风电场无功配置。

1.1 谐波谐振特性分析

为了进行海上风电场的谐波谐振分析, 本文首先建立考虑风速变化的海上风电场谐波模型, 包括风电机组、变压器、电缆、并联电抗器和公共电网谐波模型。其中, 风电机组谐波模型由背靠背变流器和异步电机构成, 背靠背变流器可解耦为转子侧变流器RSC和网侧变流器GSC, 将其等效为两个谐波电压源^[20]。网侧等效谐波源 U_{GSC} 经滤波电感向风电场注入谐波, 转

子侧等效谐波源 U_{RSC} 经过感应电机励磁系统, 由定子侧向电网注入谐波。双馈风电机组谐波模型如图2所示。

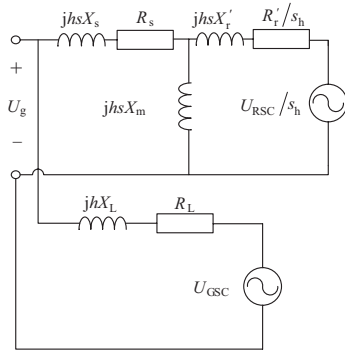


图2 双馈异步风电机组的谐波模型图
Fig. 2 Harmonic model of DFIG

双馈感应电机谐波模型受到转差率影响, 其谐波等效阻抗 $Z_{wr,h}$ 可以表示为

$$Z_h = \frac{(jhsX'_r + R'_r)jhsX_m}{jhsX'_r + R'_r + jhsX_m} + jhsX_s + \frac{R_s}{s_h} \quad (1)$$

$$Z_{wr,h} = \frac{(jhX_L + R_L)Z_h}{jhX_L + R_L + Z_h} \quad (2)$$

式中: h 为谐波次数; X'_r 为归算到定子侧的转子漏抗; R'_r 为归算到定子侧的转子电阻; R_s 为定子电阻; X_s 为定子漏抗; X_m 为励磁电抗; s_h 为 h 次谐波下的转差率; R_L 和 X_L 分别为 L 型滤波器电阻和电抗。

文献[21,25]详细介绍了转差率与风电机转速的关系, 根据 MPPT 控制, 双馈风电机组的转差率可以由风速表示为

$$s = \begin{cases} 1 - \frac{60(f_1 - \lambda_{opt}kv/2\pi R)}{pn_1}, & \text{亚同步进行} \\ 1 - \frac{60(f_1 + \lambda_{opt}kv/2\pi R)}{pn_1}, & \text{超同步进行} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p 为电机极对数; n_1 为同步转速; R 为风轮半径; v 为风速; λ_{opt} 为最佳叶尖速比, $\lambda_{opt} = \omega_r R/kv$; ω_r 为转子转速; k 为齿轮箱变比。

当风速在风电机启动风速和额定风速之间时, 风电机通常采用 MPPT 控制, 此时 λ_{opt} 为恒定值, 转差率可由式(3)得出; 当风速到达额定风速后, 为使风电机输出功率稳定, 此时采用恒功率控制, 系统调节桨距角维持功率恒定, 此时 λ_{opt} 为变化量。图3展示了风电机输出功率与转速的关系。

海上风电场其他设备谐波模型的构建方法在文献[21]有详细阐述, 此处不再赘述。

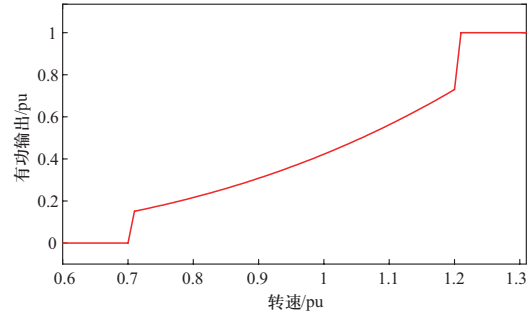


图3 双馈异步风电机转速与输出功率关系图
Fig. 3 The relationship between rotate speed and output power of DFIG

模态分析法^[22,26]是一种谐波谐振分析方法, 可用于评估系统各元件参数对谐波的影响程度。系统节点导纳矩阵 Y 可分解为

$$Y = LAT \quad (4)$$

式(4)中, $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ 为对角特征值矩阵; L 和 T 分别为左、右特征向量矩阵, 且 $L = T^{-1}$ 。式(4)可以变形为

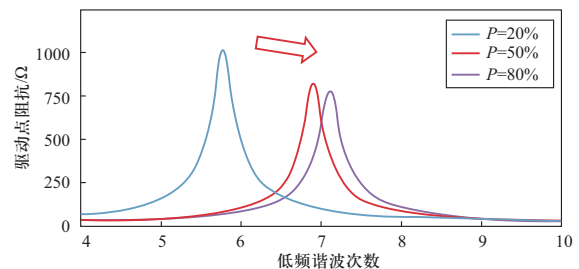
$$V = LA^{-1}TI \quad (5)$$

定义 $U = TV$ 为模态电压向量, $J = TI$ 为模态电流向量, 则式(5)可简化为

$$U = A^{-1}J \quad (6)$$

令模态阻抗 $Z = A^{-1}$, 当其特征值趋近于0时, 模态阻抗趋于无穷大, 因此无论注入的模态电流多小, 均会产生很大的模态电压。故模态分析法通过系统节点导纳矩阵的特征值可以判断是否发生谐振, 通过判断模态阻抗的大小即可判断谐振点并识别谐振位置。

本文利用模态分析法对不同工况下海上风电场的谐波模态阻抗进行扫描, 计算谐振点和谐波模态阻抗。海上风电场并网谐振模态的分析结果如下: 发现谐振频率随风电机输出功率和高压并联电抗器容量的增大而增大; 由图4(a)和图4(b)对比发现, 风电机输出功率大小主要影响低次谐振频率; 由图4(c)和图4(d)对比可发现, 高次谐振点在理想位置时, 可通过调节补偿装置容量调整低次谐振点。



(a) 风电机不同输出容量下的系统低频谐波状况

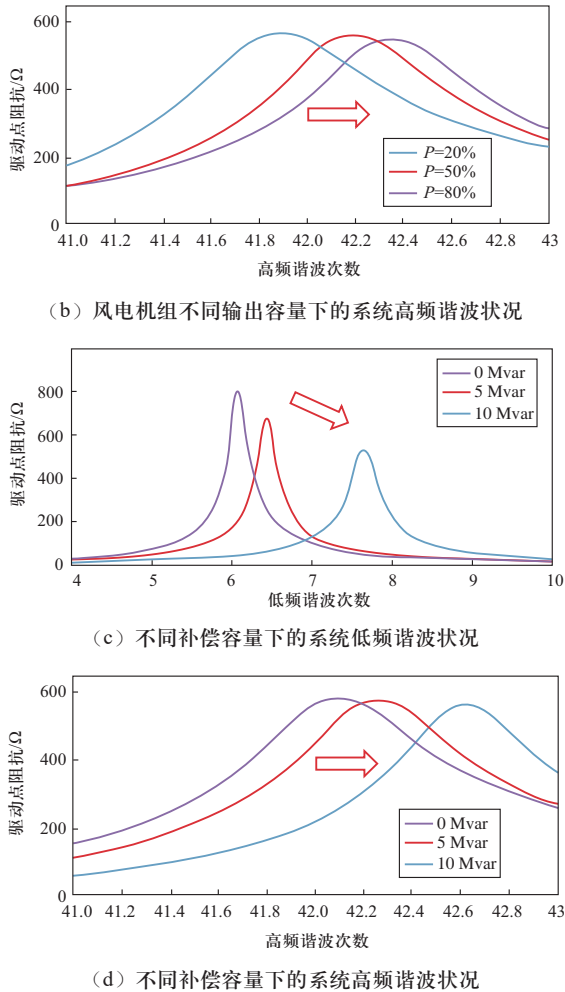


图4 海上风电场并网谐振模态分析情况

Fig. 4 Results of modal analysis of grid-connected offshore wind farm

1.2 谐波谐振约束

高压并联电抗器分组容量选择不当将会导致电抗器与线路电容发生并联谐振，而调整补偿容量可以改变系统谐振点。因此，在对高压并联电抗器分组时选择以谐波谐振为约束，避免系统谐振点与特征谐波或背景谐波重合。电网背景谐波以3次、5次、7次、11次和13次谐波为主，而风电机组的特征谐波为 $6n \pm 1$ 次，因此，谐波谐振约束为

$$\begin{cases} f_h \neq 3, 5, 7, 11, 13, \forall P_{out} \\ f_h \neq 6n \pm 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中： f_h 为谐振频率； P_{out} 为有功输出； n 为正整数。

2 海上风电场无功特性

双馈异步风电机通过对交直交变频器的控制调整可以实现有功和无功解耦控制，具备动态调节无功输

出能力，根据海上风电场的无功配置技术要求风电场功率因数可在超前0.95至滞后0.95范围内动态调整，在不影响有功出力情况下可以灵活调节无功输出。

本文为分析海上风电场无功特性，首先对各种发电出力水平和并网点电压的工作点进行遍历，计算风电机组从空载到满发和并网点电压从0.97 pu变化到1.07 pu时的风电场无功功率缺额，绘制风电机组功率因数为超前0.95和滞后0.95时的无功缺额曲面，得到最小的容性无功补偿量 $Q_{c,min}$ 和感性无功补偿量 $Q_{l,min}$ 。

其中，高压并联电抗器可进行容性无功补偿，STATCOM可进行容性和感性无功补偿。因此，考虑风电机组无功调节能力的最低补偿容量约束可表示为

$$\begin{cases} Q_{SR} + Q_{STATCOM} \geq Q_{c,min} \\ Q_{STATCOM} \geq Q_{l,min} \end{cases} \quad (8)$$

式中： Q_{SR} 为高压并联电抗器补偿容量； $Q_{STATCOM}$ 为STATCOM补偿容量。

3 无功优化配置方法

由于静态高压并联电抗器为离散型无功补偿装置，调节范围固定且不连续，调节时间长，为分钟级，但装置成本和运行成本较低；而动态无功补偿装置可连续动态平滑调节，调节时间短，为秒级，其装置成本和运行成本相对较高；因此本文所提方法先进行静态无功容量优化，而后进行动态无功容量优化。

3.1 静态无功容量优化

根据并网点在额定电压时不同发电出力水平对应的无功缺额，确定并联高压电抗器的补偿总容量。

确定高压并联电抗器补偿容量时，考虑风电机组发出不同有功功率 P_{DFIG} 时的无功需求 Q 不同，将无功需求 Q 作为控制变量，以内部节点电压偏差最小为目标，利用遗传算法分别对风电机组空载和满发两种情况进行计算，得到无功需求量 Q_{max} 和 Q_{min} 。其目标函数为

$$\min F(Q) = \sum_{i=1}^N (U_i - U_{i,ref})^2 \quad (9)$$

式中： Q 为风电场无功需求； U_i 为第 i 节点电压； $U_{i,ref}$ 为第 i 节点参考电压； N 为海上风电场节点集。

功率平衡约束为

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (10)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为第*i*节点注入的有功功率、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 为*i*、*j*节点间线路的导纳; θ_{ij} 为*i*、*j*节点相位差。

为降低补偿成本, 并保留更多无功裕量, 优化时限制风电机组和STATCOM的无功出力均为0, 同时还需确保电压在合格范围内:

$$Q_{\text{DFIG}} = 0, Q_{\text{STATCOM.ref}} = 0 \quad (12)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (13)$$

式中: Q_{DFIG} 、 $Q_{\text{STATCOM.ref}}$ 分别为风电机组、STATCOM的无功出力; 优化计算还需考虑保证海上风电场既不从电网吸收无功功率, 也不向电网发出无功功率。

风电机组发出有功输出 P_{DFIG} 越多, 输电时的无功损耗越大。空载时由于海底电缆电纳大, 其充电功率大, 风电场呈容性无功需求, 且需求最大; 满发时容性无功需求最小, 甚至由于线路无功损耗过大而呈感性无功需求。

高压并联电抗器的补偿容量 Q_{SR} 的范围应为 $[\max(0, Q_{\min}), Q_{\max}]$ 。高压并联电抗器补偿总容量确定后, 对其补偿容量分组。为避免高压并联电抗器分组容量选择不当导致电抗器与线路电容发生并联谐振, 分组时以谐波谐振为约束, 谐波谐振约束条件如式(7)所示。

3.2 动态无功容量优化

高压并联电抗器容量和分组确定后, 进行动态补偿装置无功容量优化, 优化时以补偿装置投资费用年值与年有功网损之和为目标, 其目标函数为

$$\min F(C) = C_Q + C_{P_{\text{loss}}} = Q_{\text{STATCOM}} C_1 \frac{(1+r)^m r}{(1+r)^m - 1} + C_2 \sum P_{\text{loss}} t \quad (14)$$

式中: C_1 为单位容量投资费用; r 为贴现率; m 为设备使用年限; C_2 为单位电价; P_{loss} 为有功网损; t 为损耗时间。

上述无功补偿容量优化以静态电压稳定、最低补偿容量、电压偏差等为约束条件, 其中等式约束为功率平衡约束, 如式(10)和式(11)所示, 最低补偿容量约束如式(8)所示, 电压偏差约束如式(13)所示, 此外还需增加风电机组无功出力约束:

$$Q_{\text{DFIG.min}} \leq Q_{\text{DFIG}} \leq Q_{\text{DFIG.max}} \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{DFIG.max}}$ 和 $Q_{\text{DFIG.min}}$ 为风电机组无功出力上下限。

3.3 优化求解

上述静态无功优化模型采用遗传算法求解, 动态

无功优化模型为混合整数规划, 转化为二阶锥规划后采用CPLEX算法进行求解。具体求解流程如下。

1) 利用遗传算法进行优化求解确定静态无功容量; 输入海上风电场参数, 建立用于海上风电场无功电压计算的最优潮流模型, 通过Matpower进行潮流计算, 得到内部节点电压、无功功率等计算结果, 加入无功需求目标函数中, 然后优化计算得到输出功率-投切组数表($P_{\text{WTG-n}}$ 表)。

2) 得到静态无功容量后, 通过谐波谐振模型, 以谐振点避开特征谐波和背景谐波为约束, 优化计算高压并联电抗器的分组容量。

3) 生成初始种群参数, 将种群中的个体输入到仿真模型中, 验证当前种群内的无功配置是否能满足对动态电压、动态无功支撑、有功功率恢复、电压适应性和稳态电压恢复等约束。不满足要求时仿真终止, 生成下一代种群。

4) 将步骤3)生成的种群参数传递到动态优化模型, 求解优化模型, 计算风电场年运行成本和投资费用年值, 即计算年综合成本目标函数。

5) 判断是否达到优化终止条件, 若满足终止条件, 则优化终止并输出最终优化结果; 若不满足终止条件, 则对目前种群进行选择、交叉和变异, 生成下一代种群, 并重复步骤3)至5)。

4 仿真分析

本文采用Matlab/Simulink进行仿真验证, 图5为验证本文所提无功优化配置方法有效性的测试模型, 风电场模型共设置25台单机容量为3.6 MW的风电机组, 海底电缆长度为20 km, 其他模型参数如表1和表2所示。在陆上升压站PCC处设置了无功补偿装置, 包括

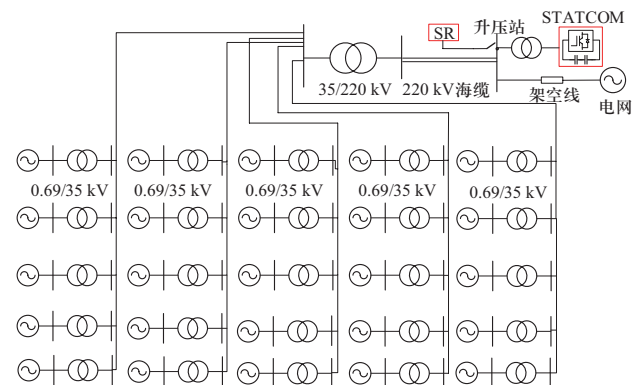


图5 海上风力发电系统仿真模型图

Fig. 5 Simulation model of offshore wind farm

高压并联电抗器和STATCOM, 以配合风力发电机组(WTs)调整并网点电压。

表1 海上风电场设备参数

Table 1 Equipment parameter of offshore wind farm

参数	数值
风电场额定功率	90 MW
风电机额定电压	0.69 kV
风电机额定功率	3.6 MW
箱式变压器	4 MVA, $U_k\% = 7$, $P_k = 28.8$ kW, $I_0\% = 1$, $P_0 = 4.55$ kW
主变压器	100 MVA, $U_k\% = 12$, $P_k = 290$ kW, $I_0\% = 0.56$, $P_0 = 92$ kW

表2 海底电缆参数

Table 2 Submarine cable parameter

参数	电阻/($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电感/(mH $\cdot \text{km}^{-1}$)	电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
35 kV海缆	0.268	0.483	0.134
220 kV海缆	0.019	0.255	0.124

为分析海上风电场的无功特性, 对各种发电出力水平和并网点电压的工作点进行遍历, 计算风电机组从零发到满发和并网点电压从0.97 pu变化到1.07 pu时的风电场无功缺额, 并绘制了如图6所示的风电机组功率因数为超前0.95和滞后0.95时的无功缺额曲面。

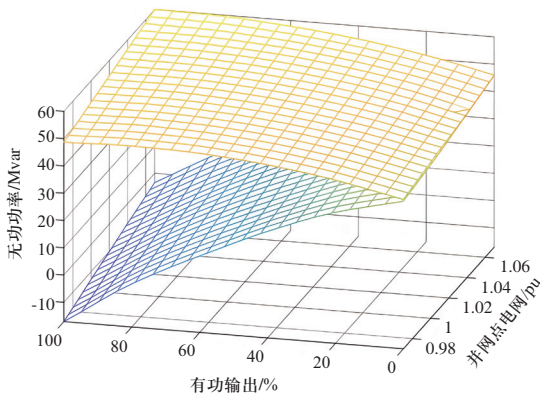


图6 海上风电场无功缺额曲面

Fig. 6 Reactive power deficit surface of offshore wind farm

由图6可看出, 由于海底电缆充电功率较大, 最小的感性无功补偿量 $Q_{l, \min}$ 为0。当并网点电压为1.07 pu且风电场输出功率为0时, 容性无功需求最大, 最小容性无功补偿量 $Q_{c, \min}$ 为45.95 Mvar。因此, 考虑风电机组无功调节能力后的最低补偿容量约束可以表示为

$$\begin{cases} Q_{\text{SR}} + Q_{\text{STATCOM}} \geq 45.95 \text{ Mvar} \\ Q_{\text{STATCOM}} \geq 0 \end{cases}$$

建立双馈风电机谐波模型, 利用模态分析法扫描风电场的谐振点和谐波模态阻抗, 利用模态分析法扫描分析的具体步骤如下^[13]。

1) 首先可求得风电系统的系统节点导纳矩阵 Y , 节点导纳矩阵具有对称性, 其上三角矩阵元素为

$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{1}{Z_g} + \frac{1}{Z_L} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{Z_{fk}} \\ Y_{1k} = -\frac{1}{Z_{fk}}, k = 2, 3, \dots, n-1 \\ Y_{kk} = \frac{1}{Z_{fk}} + \frac{1}{Z_{ok}}, k = 2, 3, \dots, n-1 \end{cases} \quad (16)$$

式中: Z_g 是PCC点处的电网等效阻抗; Z_L 是L型滤波器的等效阻抗; Z_{fk} 是第 k 个风电机群并网线路等效阻抗; Z_{ok} 是第 k 个风电机群逆变器并网等效输出阻抗。

2) 对步骤1)中的节点导纳矩阵进行特征值求解, 即求解 $Y = LAT$, 得到左特征向量矩阵 L 、右特征向量矩阵 T 和对角特征值矩阵 Λ 。

3) 通过左特征向量矩阵 L 和右特征向量矩阵 T , 可得模态电压向量 $V = LU$, 模态电流向量 $J = TI$, 并计算频率为 f 时的模态阻抗值 $Z = \Lambda^{-1}$ 。

4) 重复步骤2)和3)直至遍历所有可能引起系统谐振的谐波频率, 从而得到各谐波频率下的系统模态阻抗曲线图。

5) 模态阻抗值最大的点可视为关键谐振峰值点, 求得左、右特征向量矩阵后依次取其非对角线元素, 求积可得式(5)的矩阵非对角线元素, 式(5)的非对角线元素体现了各节点对所发生谐振的贡献度, 其中具有最大元素的节点可判断为系统谐振中心。

根据并网点在额定电压下不同发电出力水平对应的无功缺额, 确定并联高压电抗器的补偿总容量。考虑风电机组发出不同水平出力时的无功需求不同, 将无功需求作为控制变量, 以内部节点电压偏差最小为目标, 利用遗传算法分别对风电机组空载和满发两种情况进行计算, 得到无功需求量 Q_{\max} 为40.0 Mvar, Q_{\min} 为22.6 Mvar。选择高压并联电抗器总容量为40 Mvar, 然后根据谐波谐振约束对高压并联电抗器进行分组。

当选择5 Mvar作为单位容量进行分组时, 接入7组电抗器, 即35 Mvar时, 海上风电场的模态阻抗图如图7所示。图中展示了三组接近背景谐波或特征谐波且模态阻抗较大的关键模态, 可以看出, 当风电机

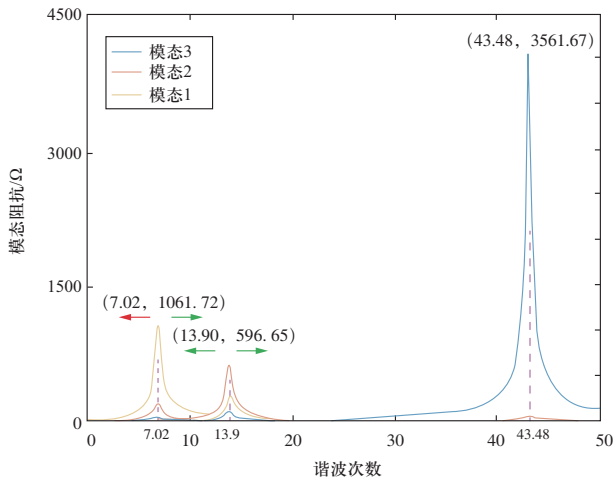


图 7 接入35 Mvar电抗器时模态阻抗图

Fig. 7 The modal impedance diagram when the 35 Mvar reactor is connected

组输出功率降低, 转差率减小时, 模态1谐振频率与电网背景7次谐波重合, 将引起严重的谐波谐振。

图8—图10展示了选择单位分组容量为8 Mvar时, 接入3组(24 Mvar)、4组(32 Mvar)和5组(40 Mvar)时的模态阻抗。当接入24 Mvar电抗器时, 对应的风电机组的输出功率较大, 输出功率减少时, 谐振点向左移动, 模态1、2将分别远离背景3次谐波和13次谐波, 而模态3谐振频率对电抗器容量和输出功率变化的灵敏度较低, 基本不移动, 不会与43次特征谐波重合; 当接入32 Mvar电抗器时, 由于模态1、2谐振点离相邻背景谐波较远, 输出功率的变化不会引起谐波谐振; 当接入40 Mvar电抗器时, 对应的风电机组的输出功率较小, 当输出功率增大时, 模态1、2谐振点向右移动, 但距离9次和15次背景谐波较远,

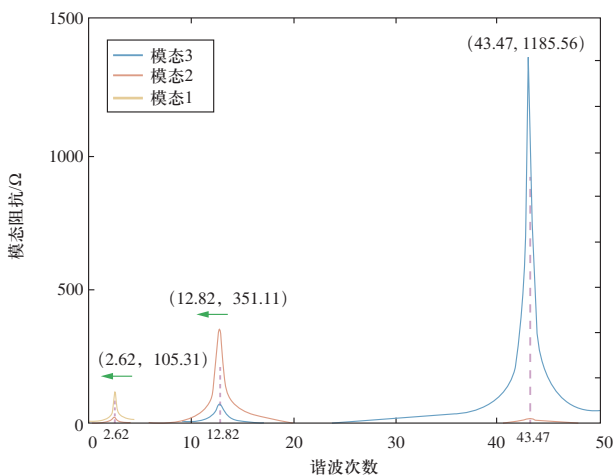


图 8 接入24 Mvar电抗器时模态阻抗图

Fig. 8 The modal impedance diagram when the 24 Mvar reactor is connected

不会引起谐波谐振。选用8 Mvar作为单位分组容量可以满足谐波谐振约束, 其输出功率-投切组数如表3所示。

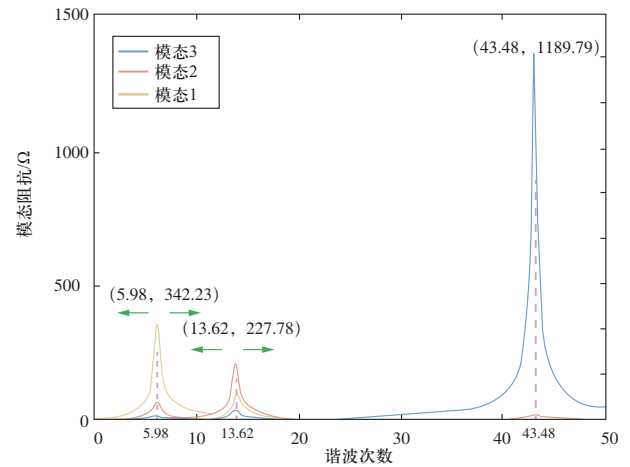


图 9 接入32 Mvar电抗器时模态阻抗图

Fig. 9 The modal impedance diagram when the 32 Mvar reactor is connected

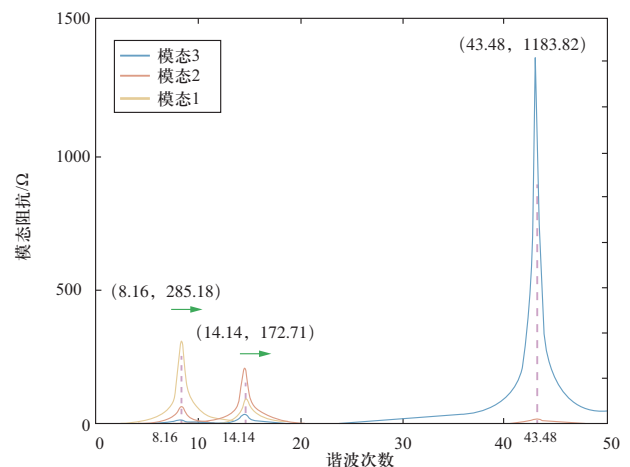


图 10 接入40 Mvar电抗器时模态阻抗图

Fig. 10 The modal impedance diagram when the 40 Mvar reactor is connected

表 3 输出功率-投切组数

Table 3 Output power - numbers of switching groups

输出水平	组数
0~46%	5
47%~80%	4
81%~100%	3

在确定高压并联电抗器容量和分组后, 以动态补偿装置投资费用年值与年有功网损之和为目标, 优化计算动态补偿装置无功容量。表4展示了优化过程参数与结果, 采用风电年平均利用小时数2082 h计算年

有功网损。动态无功补偿装置可以减小风电机组无功输出,降低系统内无功流动,从而降低网损。本次采用的仿真模型参数优化结果中高压并联电抗器容量充足且分组不大,从优化结果可看出,不需要过多额外的动态无功补偿装置容量来替代风电机组无功输出,因此动态无功补偿装置STATCOM的容量等于满足补偿容量约束的最小值5.95 Mvar。

表4 优化参数与结果

Table 4 Optimization parameter and result

参数	数值
Q_{STATCOM}	5.95 Mvar
C_1	30万元/Mvar
C_2	694.8元/MWh
r	5%
m	20 a
t	2082 h
P_{loss}	0.718 4 MW
$\min F(C)$	118.25 万元

5 结论

本文所提海上风电场无功优化配置方法分析了海上风电场的谐波谐振特性,在稳态各种发电出力水平和并网点电压下计算充分考虑风电机组无功调节能力后的最小补偿容量,使风电场满足技术规范对无功配置的基本要求,最大程度利用了高压并联电抗器的无功补偿能力,且在优化分组时加入了谐波谐振约束,同时考虑了补偿容量和风速对谐振点的影响,避免系统在特征谐波和背景谐波处谐振;之后本文所提方法以降低综合成本为目标,以静态电压稳定裕度和最小补偿量为约束,对动态无功补偿装置的补偿容量进行优化,在保证系统安全性的同时兼顾了经济性。

参考文献

[1] 江冰. 构建面向30·60的新型电力系统: 中国电力4.0的思考[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 534-541.
JIANG Bing. Building new power system for 30·60—reflections on China's electricity 4.0[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 534-541 (in Chinese).

[2] 刘泽洪, 周原冰, 金晨. 支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 101-112.

LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 101-112 (in Chinese).

[3] 李钢, 田杰, 王仙荣, 等. 远海风电送出技术应用现状及发展趋势[J]. 供用电, 2022, 39(11): 2-10.
LI Gang, TIAN Jie, WANG Xianrong, et al. Application status and development trend of offshore wind power transmission technology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 2-10 (in Chinese).

[4] 徐政. 海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 1-10.
XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10 (in Chinese).

[5] 李翔宇, Gayan Abeynayake, 姚良忠, 等. 欧洲海上风电发展现状及前景[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 116-126.
LI Xiangyu, ABEYNAYAKE G, YAO Liangzhong, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116-126 (in Chinese).

[6] 张佳丽, 李少彦. 海上风电产业现状及未来发展趋势展望[J]. 风能, 2018(10): 48-52.
ZHANG Jiali, LI Shaoyan. Present situation and future development trend of offshore wind power industry[J]. Wind Energy, 2018(10): 48-52 (in Chinese).

[7] 杨仁焯, 张琛, 蔡旭, 等. 海上风电—柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4823-4835.
YANG Renxin, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Voltage source control and fault ride-through of VSC-HVDC systems with offshore wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4823-4835 (in Chinese).

[8] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771 (in Chinese).

[9] 李再忠, 赵承汉. 海上风电交流送出系统双端无功补偿协调控制策略研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(6): 10-12.
LI Zaizhong, ZHAO Chenghan. Research on coordinated control strategy of dual-terminal reactive Power Compensation for offshore wind power AC transmission system[J]. Electrical Automation, 2022, 44(6): 10-12 (in Chinese).

[10] 陈鸿琳, 熊馨瑶, 余浩, 等. SVG对海上风电交流并网系统稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 119-129.
CHEN Honglin, XIONG Xinyao, YU Hao, et al. Analysis on the influence of an SVG on the stability of AC grid-connected offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 119-129 (in Chinese).

- [11] MD HASAN K N, RAUMA K, LUNA A, et al. Harmonic resonance damping in wind power plant[C]//2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). September 15-20, 2012. Raleigh, NC, USA. IEEE, 2012: 2067-2074.
- [12] 高晨, 赵勇, 汪德良, 等. 海上风电机组电气设备状态检修技术研究现状与展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(增刊1): 30-42.
GAO Chen, ZHAO Yong, WANG Deliang, et al. Research status and prospect of condition based maintenance technology for offshore wind turbine electrical equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 30-42 (in Chinese).
- [13] 陈鸿琳, 熊馨瑶, 余浩, 等. SVG对海上风电交流并网系统稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 119-129.
CHEN Honglin, XIONG Xinyao, YU Hao, et al. Analysis on the influence of an SVG on the stability of AC grid-connected offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 119-129 (in Chinese).
- [14] 刘士利, 罗英楠, 刘宗焯, 等. 饱和多孔介质对流特性对高压交流海底电缆载流性能的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 1023-1031.
LIU Shili, LUO Yingnan, LIU Zongye, et al. The influence of convective characteristics of saturated porous media on ampacity performance of submarine cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 1023-1031 (in Chinese).
- [15] SHAFIU A, HERNANDEZ A, SCHEITTLER F, et al. Harmonic studies for offshore windfarms[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2010). London, UK. IET, 2010.
- [16] 樊熠, 张金平, 谢健, 等. 风电场谐波谐振测试与分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 147-151.
FAN Yi, ZHANG Jinping, XIE Jian, et al. Testing and analysis for harmonic resonance of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 147-151 (in Chinese).
- [17] 许斌, 张志强, 李程昊, 等. 应用于双馈风力发电机的LCL型滤波器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 44-50.
XU Bin, ZHANG Zhiqiang, LI Chenghao, et al. LCL filters applied in doubly fed induction generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 44-50 (in Chinese).
- [18] 罗红梅, 申旭辉, 董立, 等. 采用交流海缆接入的海上风电场无功配置方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 1-10.
LUO Hongmei, SHEN Xuhui, DONG Li, et al. Reactive power configuration method of offshore wind power with access of AC submarine cable[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 1-10(in Chinese).
- [19] 符杨, 潘翔龙, 黄玲玲. 考虑双馈机组无功调节能力的海上风电场无功优化[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2168-2173.
FU Yang, PAN Xianglong, HUANG Lingling. Reactive power optimization for offshore wind farm considering reactive power regulation capability of doubly-fed induction generators[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2168-2173 (in Chinese).
- [20] 郭高鹏, 方佳良, 豆书亮, 等. 考虑海上风电接入的电网侧无功补偿策略[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 65-70.
GUO Gaopeng, FANG Jialiang, DOU Shuliang, et al. A power network side reactive power compensation strategy considering offshore wind farms integrated[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 65-70 (in Chinese).
- [21] 戎骏, 胡海涛, 邵洋, 等. 基于敏感度分析的海上风电场谐波谐振研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2510-2517.
RONG Jun, HU Haitao, SHAO Yang, et al. Harmonic resonance assessment for offshore wind farm based on sensitivity analysis[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2510-2517 (in Chinese).
- [22] 唐振东, 杨洪耕. 基于模态分析的风电场并网谐波谐振研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 87-92.
TANG Zhendong, YANG Honggeng. Harmonic resonance research based on modal analysis for grid-connected wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 87-92 (in Chinese).
- [23] 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, 31(6): 32-38.
ZHANG Zhengguo, YU Dan, XU Ying, et al. Design study on reactive power compensation of long and high voltage submarine cable[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(6): 32-38 (in Chinese).
- [24] 赵大伟, 马进, 钱敏慧, 等. 海上风电场经交流电缆送出系统的无功配置与协调控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1412-1421.
ZHAO Dawei, MA Jin, QIAN Minhui, et al. Reactive power configuration and coordinated control of offshore wind farms connected to power grid with AC cables[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1412-1421 (in Chinese).
- [25] 郭涛. 含双馈风力发电机的风电场谐波分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [26] XU W, HUANG Z Y, CUI Y, et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2023-03-28。



杜婉琳

作者简介:

杜婉琳(1993), 女, 工程师, 研究方向为电压质量数据监测与应用, 电能质量分析。通信作者, E-mail: wanlind3730@163.com。

梅桂华(1963), 男, 正高级工程师, 研究方向为电能质量分析评估技术、电力系统运行分析, E-mail: meiguihua@dgy.gd.csg.cn。

(责任编辑 张鹏)