

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240917

海上风电场并网点无功趋优控制区间整定

肖红燕¹, 钟康骅¹, 樊玮², 羿应棋¹, 霍嘉兴¹, 张勇军¹

(1. 智慧能源工程技术研究中心华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510062)

摘要: 海上风电场并网往往加剧了接入点所在区域的无功电压波动, 现有的自动电压控制策略难以适应其无功调节需求。为此, 以节能为导向, 提出了一种适用于海上风电场并网点的实用化无功趋优控制区间整定方法。首先, 结合海上风电场的运行特性, 研究了并网区域的有功损耗二次曲线。然后, 根据海上风电场的有功出力能力进行有功出力场景划分。并通过以有功损耗差值最小为原则给定趋优代价, 根据趋优代价求取无功趋优控制区间。最后将不同场景下的一系列区间通过半不变量法进行整定得出差异化的无功控制区间上下限定值。基于实际海上风电场并网场景进行仿真实验, 表明所提无功趋优区间定值的应用可以显著提高并网区域的能效和电压稳定性, 为海上风电场并网的无功控制提供了一种有效的解决方案。

关键词: 海上风电场; 无功趋优控制; 趋优区间; 区间整定; 场景分类

Reactive power optimization control interval setting for offshore wind farm grid connection points

XIAO Hongyan¹, ZHONG Kanghua¹, FAN Wei², YI Yingqi¹, HUO Jiaxing¹, ZHANG Yongjun¹

(1. Smart Energy Engineering Technology Research Center, School of Electric Power, South China University of Technology,

Guangzhou 510640, China; 2. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong

Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510062, China)

Abstract: The integration of offshore wind farms into the power grid often accelerates reactive power and voltage fluctuations in the access point area, rendering existing automatic voltage control (AVC) strategy insufficient to meet the reactive power regulation requirements. To address this, an energy-saving-oriented and practical method for setting reactive power optimization control intervals at grid connection points of offshore wind farms is proposed. First, considering the operational characteristics of offshore wind farms, the quadratic curve of active power loss in the grid connection area is investigated. Then, active output scenarios are categorized according to the active power output capacity of the offshore wind farm. By using the principle of minimizing active power loss differences to define the optimization cost, the reactive power optimization control interval is determined accordingly. Finally, a series of intervals under different scenarios are adjusted using the semi-invariant method to obtain the differentiated upper and lower limit values for reactive power control. Simulation experiments based on actual offshore wind farm grid connection scenarios show that the proposed method significantly improves energy efficiency and voltage stability in the grid connection area, offering an effective solution for reactive power control in offshore wind power integration.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2024A1515010435).

Key words: offshore wind farm; reactive power optimization control; optimization interval; interval tuning; scene classification

0 引言

风力发电作为一种清洁、可再生的能源形式,

基金项目: 广东省自然科学基金项目资助(2024A1515010435);
南方电网公司科技项目资助(036000KK52222013(GDKJXM
20222142))

正成为电力系统转型的重要组成部分。然而, 风电的波动性、不确定性和反调峰特性给电网运行带来了诸多挑战。特别是海上风电并网, 由于其发电出力的快速波动性, 引起集电网的无功损耗波动又快又大, 导致现有电网的自动电压控制(automatic voltage control, AVC)策略难以适应^[1-2]。

含风电场的无功优化问题已成为当今的重要研

究方向。目前该领域的研究包括风电场系统的全局无功优化^[3-5]和风电场无功补偿设备的协调控制等两类。其中风电场的全局无功优化^[6-9]通过给定目标函数,设定功率和电压等约束条件,采用优化算法得到最优的无功调控值^[10-12]。如文献[10]以系统有功网损和并网点电压偏离量的加权最小作为目标函数,考虑海上运行的功率约束、安全运行约束等,采用变惯性权重粒子群优化算法对无功控制策略进行求解,较好地实现有功网损和并网点电压的协调优化;文献[11]首先分析了海上风电风速、接入系统电压和风机无功输出对无功电压分布的影响,以损耗最小和电压合格为目标建立考虑风机无功输出能力的无功优化策略;文献[12]以海缆最大电流和系统损耗为目标函数进行无功优化,最终实现无功快速灵活调节。

风电场的无功补偿设备协调控制即通过对离散设备和连续调节设备的协调控制,比较不同控制模式下的经济性和安全性,选取最优控制策略^[13-16]。文献[13]研究了静止无功发生器(static var generator, SVG)不同控制方式和参数对海上风电交流并网系统主导振荡模式的影响,对比算例确定最优控制模式;文献[14]考虑了海缆的充电功率大量盈余情况,制定了海上风电无功补偿方案配置流程,将 SVG 与高压电抗器配合使用实现无功补偿和抑制过电压;文献[15]对风电场两侧进行无功补偿,考虑风机自身无功调节能力,在陆端和集电侧进行无功配置。

上述研究中的无功控制策略大多为面向单时间断面的“点控制”,电压波动的情况下,为使目标最优,离散设备需要多次调节,无功调节代价^[16-17]较高。即便考虑连续断面的动态无功优化,也往往受限于计算复杂度而难以在现有 AVC 系统中推广应用。为适应海上风电场并网点区域电压波动较快情况下无功的动态调节,实现将传统的无功优化“点控制”转向“区间控制”,提高无功设备调节的经济性,并适应故障情况下的连续调节,采用趋优控制对并网点近区求取无功控制区间。

已有文献对电网无功电压趋优控制^[18-20]进行分析。文献[19]考虑了风电不确定性对关口无功优化区间的影响,分别对风电场有功功率出力上限、中值和边界分析求取无功区间,并得到无功区间矩阵,但没有考虑将风电出力的连续变化情况加入到区间的求取中;文献[20]采用区域无功均分法对环网内的关口无功区间进行差异化整定,但该方法的研究场景为变电站,且没有考虑到某个站点的功率波动性,无功调节为离散无功设备,无法适应目前海上

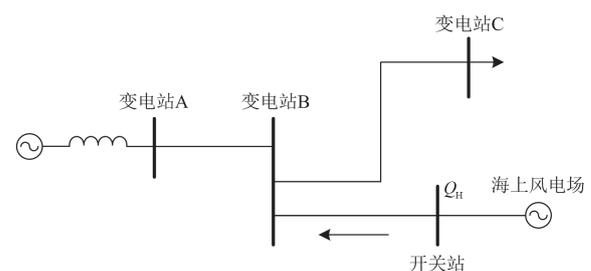
风电场出力随机变化下的无功区间求取。现有关于趋优控制^[21-23]的文献都是面向变电站场景及其离散设备进行无功调控,并不适用于海上风电场并网点处的无功控制区间求取。

为此,本文针对海上风电场^[24-26]并网场景,考虑风电出力快速波动特性,对风电场处开关站的关口无功趋优控制区间进行整定,便于在现有电网 AVC 系统中直接使用。本文首先分析了系统总有功损耗与关口无功的特性,根据影响因子得到初步无功区间。其次考虑到风电场有功出力的随机性与波动性,对有功出力场景进行分类,得到不同场景下的无功优化区间。对于不同场景下的无功优化区间随着有功出力的波动而变化的情况,本文对无功区间进行整定,采用半不变量法并结合特征指标代替原始区间,计算得到最终无功趋优控制区间。仿真结果证实了无功趋优区间对于提升电压质量和降低网损有重要作用。

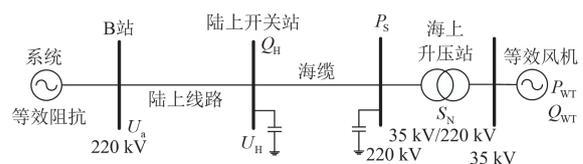
1 海上风电场并网系统模型搭建

1.1 并网线路模型

海上风电场是一种利用海上风能发电的设施,通常由多个风力发电机组组成,并安装在离海岸一定距离的海域。海上风电中风机通过升压变将 35 kV 电压变换为 220 kV,再通过海缆连接至开关站处,输送给主网供用电。海上风电场并网拓扑如图 1 所示,图 1(a)中风电场先接入 220 kV 变电站 B 并网,进而联络到 220 kV 变电站 C 和 500 kV 变电站 A;图 1(b)为海上等效风机并网区域的模型。



(a) 海上风电场并网连接场站图



(b) 等效风机并网区域模型

图 1 海上风电并网示意图

Fig. 1 Offshore wind grid connection schematic

图 1 中: Q_H 为陆上开关站的无功功率; U_a 为 B 站的电压; U_H 为陆上开关站的电压; P_s 为升压站高压侧的有功功率; S_N 为升压变压器的额定容量; P_{WT} 和 Q_{WT} 分别为风机的有功功率和无功功率。

1.2 开关站所在支路有功损耗影响因子

分析图 1(b)可得, 海上升压站变压器处有功损耗 ΔP_T 和无功损耗 ΔQ_T 分别如式(1)和式(2)^[27]所示。

$$\Delta P_T = P_0 + P_k \frac{P_{WT}^2 + Q_{WT}^2}{S_N^2} \quad (1)$$

$$\Delta Q_T = \frac{I_0 \%}{100} S_N + \frac{U_k \%}{100} \frac{P_{WT}^2 + Q_{WT}^2}{S_N} \quad (2)$$

式中: P_0 和 P_k 分别为变压器的空载损耗和短路损耗; $I_0 \%$ 为变压器的空载电流百分比; $U_k \%$ 为变压器的短路电压百分比。

海缆上的有功损耗 ΔP_s 为

$$\Delta P_s = \frac{(P_{WT} + \Delta P_T)^2 + (Q_{WT} + \Delta Q_T)^2}{220^2} r_s l_s \quad (3)$$

式中: r_s 和 l_s 分别为海缆的单位长度电阻和海缆线路长度。

陆上线路有功损耗 ΔP_L 为

$$\Delta P_L = \frac{(P_1^2 + Q_1^2) r_L l_L}{U_H^2} \quad (4)$$

式中: $P_1 = P_{WT} + \Delta P_T + \Delta P_s$; $Q_1 = Q_H - \frac{bl_L U_H^2}{2}$, b 为母线处的电纳; r_L 和 l_L 分别为陆上线路的单位长度电阻和线路长度。

由上可得线路有功损耗和关口电压分别为

$$\Delta P_L = \frac{[(P_{WT} + \Delta P_T + \Delta P_s)^2 + (Q_H - \frac{bl_L U_H^2}{2})^2] r_L l_L}{U_H^2} \quad (5)$$

$$U_H = U_a - \frac{(P_{WT} + \Delta P_T) r_L l_L + (Q_H - bl_L U_H^2 / 2) x l_L}{U_H} \quad (6)$$

式中: x 为线路单位长度电纳值。并网区域总损耗 P_{Loss} 为线路损耗与升压站损耗之和, 即

$$P_{Loss} = \Delta P_T + \Delta P_L + \Delta P_s \quad (7)$$

综上可得, 海上风电场风机到陆上开关站处的总有功损耗影响包括: 风机的出力、变压器容量、海缆参数、关口无功。在线路结构和设备参数已给定的条件下, 总有功损耗只与风机的出力和关口无功的变化对有功损耗的影响。此外, 考虑到海上风电波动对全电网的功率损耗影响主要在于并网区域, 因此, 只要研究并网区域部分系统的损耗特性

来形成 AVC 策略, 就是符合无功优化目标的策略。

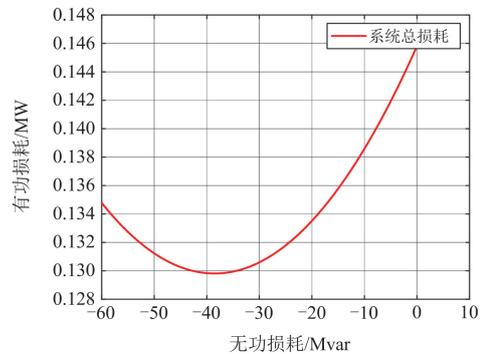
2 考虑风电出力波动的有功损耗变化机理

2.1 风电场有功出力为定值

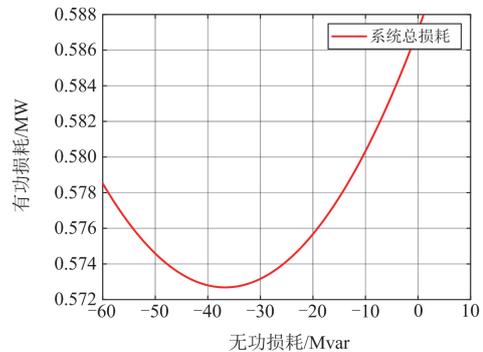
根据 1.2 节中对有功损耗影响因子的分析, 可以得出当风电场有功出力给定时, 有功损耗是关于关口无功的一元二次函数, 但在风电有功出力变化的情况下, 区域系统的有功损耗与关口无功的相关性曲线同样在变化, 因此本节首先分析其中的机理。

根据式(1)、式(3)、式(5)和式(7), 假设海上风电场的有功出力分别为 22、100、220、330 MW, 不同场景下得到的区域系统有功损耗随关口无功的变化趋势, 如图 2 所示。可以看出, 有功损耗与关口无功的相关性呈 U 形二次曲线特性, 而且随着风电有功出力的增加, U 形曲线呈右移的规律。

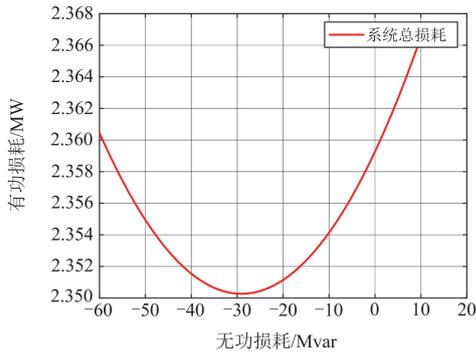
根据图 2 的有功损耗二次曲线可知, 存在某个最优关口无功值, 使系统有功损耗最小。考虑到无功的“点控制”较难实现, 精准性低, 且面对风电场电压无功随机波动问题时调节频繁, 因而应结合图 2 的损耗特性放宽为趋优控制, 求取在最优关口无功值附近的一个无功趋优控制区间。如图 2(d)所示, 当关口无功值控制在 $[-40, 10]$ Mvar 范围内, 有功损耗都相对较低并接近最小值, 但关口无功控制目标已经从“点控制”放宽到 50 Mvar 的允许波动



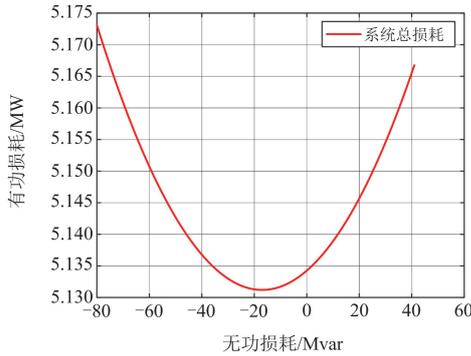
(a) 有功出力值为 22 MW



(b) 有功出力值为 100 MW



(c) 有功出力值为220 MW



(d) 有功出力值为330 MW

图2 有功损耗二次曲线

Fig. 2 Active loss quadratic curve

区间了,从而达到兼顾降损和避免频繁调节的效果。加上此区间内总体无功交换量较小,对电压的影响也就相对较小,对保证电压质量也是有帮助的。

2.2 风电场有功出力动态变化下有功损耗分析

根据 2.1 节可知,开关站处关口无功与系统总有功损耗间存在非线性关系,存在某个最优关口无功值,使系统总有功损耗最小。考虑到风电场的有功出力具有随机性,一天中风电出力的大小在不断变化,观察图 2,随着风电场有功出力的增大,有功损耗特性曲线逐渐往横坐标右边偏移,若想用一个趋优控制区间来覆盖整个风电场的各种有功出力情况,则计算得出的关口无功趋优区间范围很大,并且无法保证各种出力场景下的有功损耗趋优。换言之,关口无功区间越大,有功损耗波动范围越大,从节能的角度看,需要对风电场的有功出力场景进行细化划分,以得到不同场景下差异化的精确关口无功趋优区间。前文有功损耗二次曲线的分析中,得出系统有功损耗与风电场有功出力有关,而关口无功的变化,同样改变着系统的有功损耗,本文按照风电场总容量等间隔划分为 4 个场景,计算不同场景有功出力下的有功损耗随关口无功的变化特性。

场景分类取决于风电场的额定容量和实际有功出力的波动情况,根据给定风电场的模型,用经验法对场景进行分类。

划分场景后,将有功损耗随关口无功变化的有功损耗二次曲线定义为样本 X_{ij} , i 表示第 i 个场景, j 表示该类场景中的第 j 个样本,且

$$X_i = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}] \quad (8)$$

式中: m 为场景下的样本数量; X_i 为第 i 个场景下的所有有功损耗二次曲线样本数组。

根据每个场景的有功损耗二次曲线,得到该场景下的风电场有功出力 P_{ij} ,最终得到 k 个场景的有功损耗二次曲线。

3 开关站关口无功区间整定

3.1 无功趋优控制区间整定

根据第 2 节得到的不同场景下有功损耗二次曲线,本节采用趋优控制原则求取无功趋优控制区间^[28],通过给定不同场景下^[23]的趋优代价,得出不同风电场有功出力的无功趋优控制区间,步骤如下。

步骤 1 根据每个场景下的有功出力值,将不同的有功损耗二次曲线进行归类,并根据有功损耗二次曲线得出最优关口无功值。

步骤 2 采用定 ΔP 法^[19-20],即每个场景下确定最大有功损耗差值,定义趋优代价 τ 为

$$\tau = \frac{P_{\text{LOSS},ij}^m - P_{\text{LOSSmin},ij}}{P_{\text{LOSSmin},ij}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{LOSSmin},ij}$ 为有功损耗特性曲线的最小值;

$P_{\text{LOSS},ij}^m$ 为该场景下所能接受的有功损耗最大值。

步骤 3 结合趋优代价和所能接受的最大有功损耗值,根据第 2 节中有功损耗与关口无功的变化关系得到无功趋优控制区间上下限。

根据步骤 2 得到趋优代价,不同出力场景下的趋优代价不同,由式(9)可得,趋优代价根据不同场景的有功损耗特性曲线的最小值与所能接受的有功损耗最大值确定。

由于风电场的出力具有波动性,即使划分了 n 个场景,但在每个场景下有功仍然存在波动,因此得出的无功区间也具有多样性。针对每个场景下存在较多无功区间的问题,下面将对同一场景下的区间进行优化,得到不同场景的区间定值。

3.2 基于半不变量法的出力场景下区间优化方法

海上风电场出力具有波动性,得到多组无功趋优控制区间后,本文采用半不变量法^[29]对区间分布的特性进行估计,即简化每个场景下得到的多组无

功趋优区间, 最终每个场景下仅保留一个典型的趋优控制区间。本文采用半不变量法求取概率密度函数, 并结合 Cham-charlier 级数^[29]来求取无功趋优控制区间分布。

考虑到场景中风电场有功出力的波动, 随着出力波动得到多个波动的无功趋优控制区间, 为了使不同场景下的无功趋优控制区间具有统一性, 需要对每个场景下得到的区间进行优化, 并将其等效为相应指标进行优化, 本文采用区间长度和区间中心代替原始区间。

$$\begin{cases} Q_{Lj} = Q_{upj} - Q_{downj} \\ Q_{CTj} = (Q_{upj} + Q_{downj})/2 \end{cases} \quad (10)$$

式中: Q_{upj} 、 Q_{downj} 分别为某场景下第 j 个区间的上、下限; Q_{Lj} 为第 j 个区间的区间长度; Q_{CTj} 为第 j 个区间的区间中心。

由于在每个场景下风电的波动性, 无功趋优控制区间存在某种分布特性, 因此采用半不变量法获得区间分布。

根据半不变量法, 首先求取分布的各阶矩, 随后通过各阶矩展开半不变量, 并代入到概率密度函数中, 得到区间分布。最后通过构建置信度为 95% 的置信区间, 得到区间的典型代表值。本文采用区间中心的分布特性代表原始区间的分布特性, 根据半不变量法求取区间中心概率密度的步骤如下。

1) 随机变量的各阶中心距 M_v 为

$$M_v = \sum_j p(Q_{CTj} - \mu)^v \quad (11)$$

式中: v 为阶数; p 为给定概率; μ 为某场景下所有区间中心的均值。根据各阶中心距得到各阶半不变量, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} K_2 = M_2 \\ K_3 = M_3 \\ K_4 = M_4 - 3M_2^2 \\ K_5 = M_5 - 10M_3M_2 \\ K_6 = M_6 - 15M_4M_2 - 10M_3^2 + 30M_2^3 \end{cases} \quad (12)$$

2) 利用半不变量表示各 Gram-Charlier 级数展开式的系数, 得到概率密度函数表达式, 如式(13)所示。

$$p(Q_{CT}) = N(Q_{CT}) \left[1 + \frac{g_3}{3!} H_3(Q_{CT}) + \frac{g_4}{4!} H_4(Q_{CT}) + \frac{g_5}{5!} H_5(Q_{CT}) + \frac{g_6 + 10g_3^2}{6!} H_6(Q_{CT}) + \frac{g_7 + 35g_3g_4}{7!} H_7(Q_{CT}) + \frac{g_8 + 56g_3g_5 + 35g_4^2}{8!} H_8(Q_{CT}) + \dots \right] \quad (13)$$

式中: $N(Q_{CT})$ 为标准正态密度函数; Q_{CT} 为规格化区间中心; g_v 为规格化的各阶半不变量, $g_v = K_v/K_2^{v/2}$; $H_v(Q_{CT})$ 为 Hermite 多项式。

3) 求出区间中心的概率密度函数后, 得到区间中心分布特性, 根据给定置信度求取置信区间, 得到最终区间中心 Q_C 。

4) 将最终区间中心代入到原始区间的区间中心和区间长度映射关系中, 得出最终区间长度。

5) 把最终区间中心和最终区间长度代入到式(10), 得到最终区间上下限。

根据海上风电场的出力特性, 结合趋优控制原则求出每个场景下的多个区间后, 采用上述优化方法进行区间整定, 使每个场景下只有一个典型无功趋优控制区间。海上风电场可以根据相应的出力特性, 采用本文所得无功趋优控制区间, 控制开关站的 SVG, 在保证区域电网有功损耗相对较低的同时确保关口电压稳定。本文求取不同场景下关口无功趋优控制区间的流程图如图 3 所示。

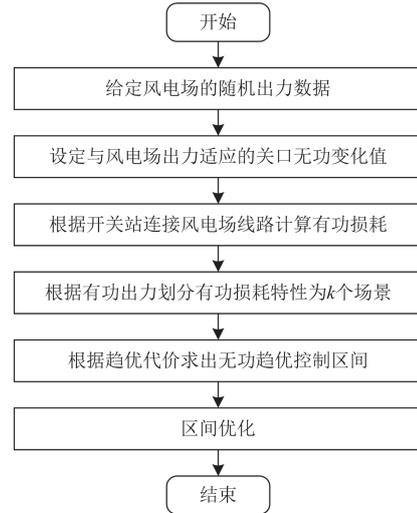


图 3 无功趋优控制区间求取流程图

Fig. 3 Flowchart of reactive power optimization control interval acquisition

4 仿真实验

本文采用某额定容量为 600 MW 的实际风电场进行仿真实验, 以验证该趋优方法的有效性。已知该风电场通过升压站和海缆连接陆上开关站, 并通过传输线路将功率传输给相应站台。该风电场的有功出力采样间隔为 10 min, 某天内的采样总时刻数为 144, 采用该天的数据进行仿真计算。海上风电场升压站的空载损耗为 98 kW, 负载损耗为 568 kW, 变压器容量为 240 MVA, 海缆参数如表 1 所示。表

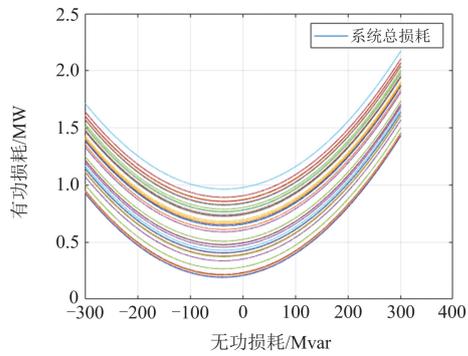
中 R_0 、 L_0 和 C_0 分别为每千米导体直流/交流电阻、电感和电容值。

表 1 220 kV 海缆参数

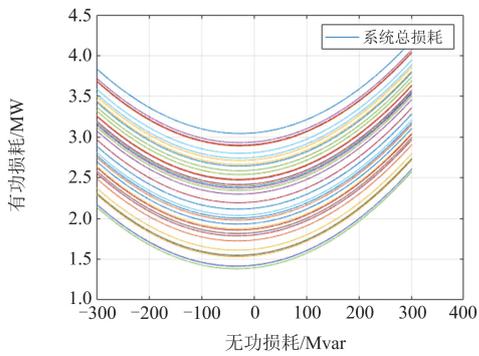
Table 1 220 kV submarine cable parameters

参数	3×1000 mm ² 截面	3×630 mm ² 截面
R_0/Ω	0.0224	0.0176
L_0/mH	0.5390	0.7641
$C_0/\mu\text{F}$	0.1680	0.1699

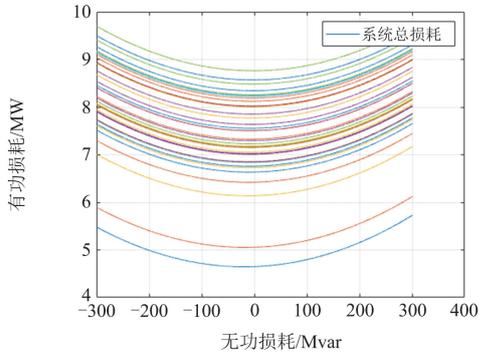
根据表 1 中的参数，结合本文的有功损耗二次曲线求取方法与场景划分原则，将出力场景按风电场总容量 600 MW 等间隔划分为 4 类场景，得到一系列有功损耗特性曲线图，如图 4 所示。



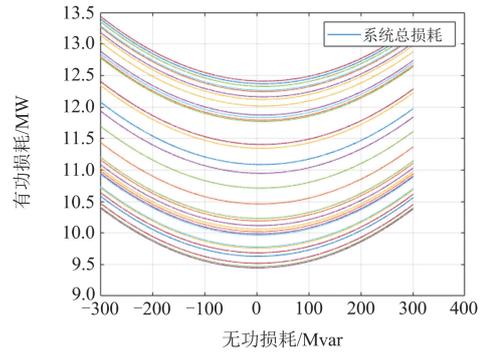
(a) 场景1



(b) 场景2



(c) 场景3



(d) 场景4

图 4 不同场景下有功损耗特性

Fig. 4 Active power loss characteristics in different scenarios

由图 4 可知，随着风电场有功出力的增大，有功损耗逐渐增大，关口无功的变化范围也在增大，当风电场的有功出力增大到额定容量附近时，如图 4(d)所示，图中各有功损耗特性曲线弧度较大。根据图 4 中的有功损耗特性曲线，采用本文的趋优控制原则即可求出无功趋优控制区间。

对以上二次曲线选取合适的趋优代价，采用定 ΔP 法得到关口无功趋优控制区间如表 2 所示，每个场景下无功区间个数较多，表 2 只列出了各场景下的 3 个典型区间。

表 2 不同场景下的无功趋优控制区间

Table 2 Reactive power optimization control intervals in different scenarios

场景序号	有功出力/ MW	无功趋优控制区 间下限/Mvar	无功趋优控制区 间上限/Mvar
场景 1 ($\tau = 0.017$)	43.32	-45	-31
	86.65	-47	-27
	135.78	-50	-20
场景 2 ($\tau = 0.008$)	167.94	-43	-18
	251.90	-44	-10
	296.45	-45	-3
场景 3 ($\tau = 0.0015$)	313.54	-43	6
	393.49	-39	23
	434.13	-35	33
场景 4 ($\tau = 0.001$)	451.55	-25	29
	481.03	-21	36
	518.55	-16	42

各个场景的趋优代价根据有功损耗的最大差值来确定，场景下系统所能承受的有功损耗差值越大，趋优代价越高；表 2 中无功趋优控制区间的上下限值随着有功出力的变化而不断变化。为得到每个场景下更有普适性的无功趋优控制区间，将表 2 的无功区间采用本文所提方法进行整定合并，得到

最终的无功趋优控制区间定值如表 3 所示。

表 3 4 个场景风电场有功出力区间与相应的无功区间定值

Table 3 Wind farm active output intervals and reactive power interval settings in 4 scenarios

场景序号	出力上限/MW	出力下限/MW	整定区间/Mvar
1	150	0	[-50, -20]
2	300	150	[-40, 0]
3	450	300	[-30, 20]
4	600	450	[-20, 40]

为证实指定场景下的无功趋优控制区间为最优区间, 在每个场景下采用不同的区间进行验证, 以证实在该场景下的最终无功趋优区间有功损耗最小, 为最优区间, 结果如表 4 所示, 其中每个场景下的最优区间与场景序号相对应。表 4 还列出了有功损耗均值与年耗电量, 其中有功损耗均值 P_m 的表达式为

$$P_m = \frac{1}{L} \int_{l_{down}}^{l_{up}} P_{LOSS,i} dl \quad (14)$$

式中: L 为无功趋优控制区间总长度; l_{up} 、 l_{down} 分别为区间的上、下限; $P_{LOSS,i}$ 为无功趋优控制区间内第 i 个无功值对应的有功损耗; l 为单位区间。

表 4 不同场景下区间最优性对比

Table 4 Comparison of interval optimality in different scenarios

场景	区间	有功损耗均值/MW	年耗电量/MWh
场景 1	区间 1	0.4228	154.322
	区间 2	0.5296	193.304
	区间 3	0.4764	173.886
	区间 4	0.4390	160.235
场景 2	区间 1	3.7355	1363.458
	区间 2	3.7326	1362.399
	区间 3	3.7371	1364.042
	区间 4	3.7457	1367.181
场景 3	区间 1	7.4761	2728.777
	区间 2	7.4714	2727.061
	区间 3	7.4697	2726.441
	区间 4	7.4720	2727.280
场景 4	区间 1	11.5789	4226.298
	区间 2	11.5693	4222.795
	区间 3	11.5623	4220.239
	区间 4	11.5579	4218.634

将表 4 结果绘制成柱状图, 便于比较某一场景下采用相应的无功趋优控制区间的最优性, 如图 5 和图 6 所示。

分析表 4、图 5 和图 6 结果可知, 通过本文方法得到的无功趋优控制区间为最优区间, 该区间使

得在确定场景下的有功损耗最小, 年度耗电量最少, 证实了区间的最优性。

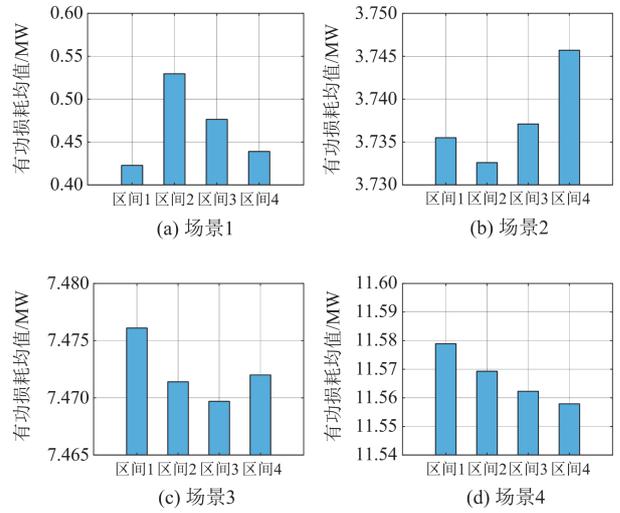


图 5 不同场景下有功损耗均值对比

Fig. 5 Comparison of the mean active loss in different scenarios

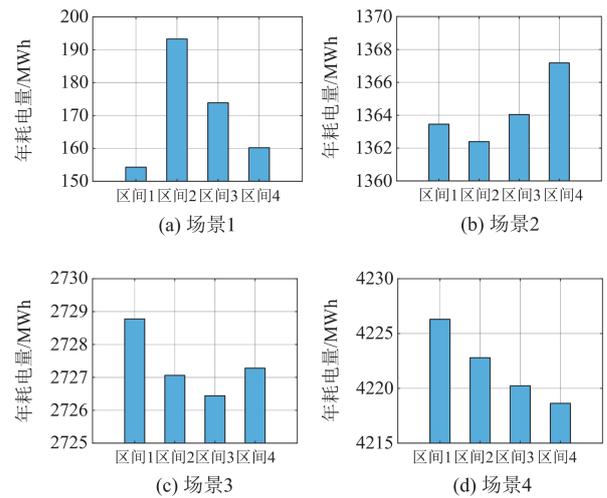


图 6 不同场景下各个区间的年耗电量对比

Fig. 6 Comparison of annual power consumption in different scenarios

对本文的无功趋优区间控制效果与传统变电站的无功趋优区间控制效果进行对比, 其中传统变电站的无功趋优控制中无功调节设备为离散设备——电容器或电抗器。传统的趋优控制采用二十区图策略^[20], 当区域的电压或无功处于越限状态时, 通过合理地调节电容器和电抗器实现对无功的调整, 使电压和无功水平恢复。改变有功出力和关口无功, 对海上风电场并网点处的运行状况进行分析。将本文趋优控制与传统趋优控制的控制效果进行对比, 结果如图 7 所示。

如图 7 可知, 本文所提趋优控制方法的综合运行损耗最低, 其中各时段的系统有功损耗比传统趋优控制结果分别下降了 2.96%、3.12%、3.08%和 2.73%, 由此可见本文所提分区策略的有效性。

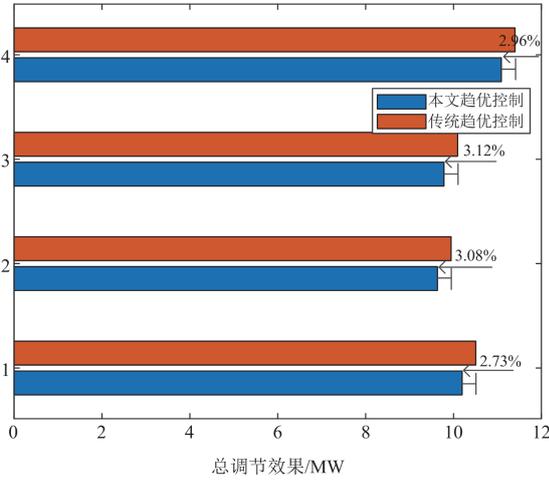


图 7 总运行效果对比

Fig. 7 Comparison of total operating results

图 8 给出了风电场未受控制情况下的并网点自然电压曲线以及采取本文控制方法后的电压曲线。显然, 自然电压曲线有很长的时间靠近甚至越过 1.07 p.u. 的上限, 而经过趋优控制后电压曲线则落到 1.00~1.025 p.u. 区间, 离电压允许上限值有较大的裕度, 更具有安全性。

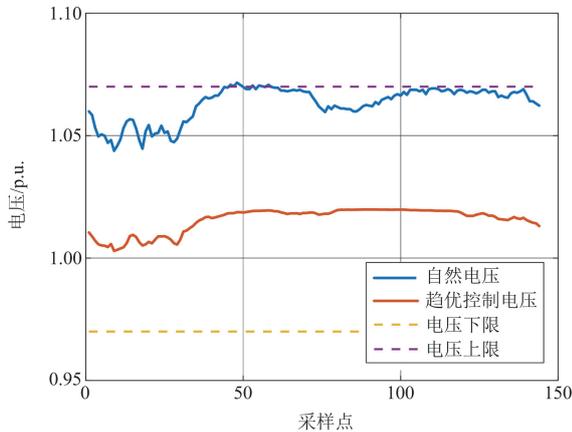


图 8 电压运行曲线

Fig. 8 Voltage operating curve

表 5 列出了不同控制方法^[20,30]在降损方面的控制效果, 选取一段时间内的有功损耗求取平均值后进行对比, 本文方法比固定控制区间的方法降损 37%、比优化功率因数控制法降损 28%, 趋优控制方法降损方面的优势非常明显。3 种控制方法下系统有功损耗曲线对比如图 9 所示。可见, 本文控制

方法下的有功损耗较其他两种方法都要低, 其中, 方法 2 主要是在风电场较低出力时有一定的降损优势, 而本文所提出的趋优控制方法在风电场较高出力的场景下同样具有降损优势。

表 5 3 种无功控制方法

Table 5 Three reactive power control methods

序号	方法	平均有功损耗/MW
1	固定控制区间	6.02
2	优化功率因数控制	5.29
3	本文趋优控制法	3.79

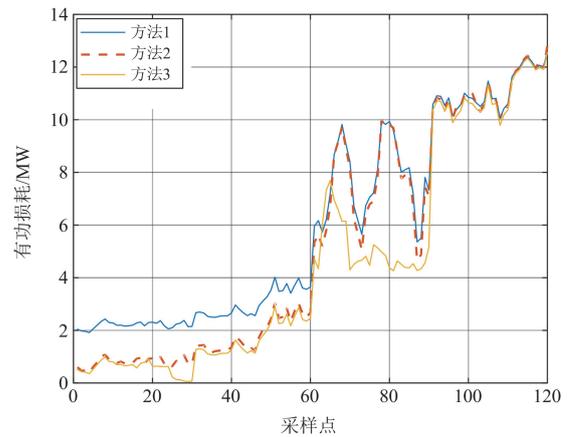


图 9 不同控制方法损耗曲线对比

Fig. 9 Loss curve comparison of different control methods

综上, 本文的趋优控制方法无论在节能损耗方面还是在电压幅值方面, 都体现出显著的优势。

5 结论

本文根据沿海区域海上风电场并网点系统的模型, 分析开关站关口处的无功调节和有功损耗的特性, 得出适用于海上风电场有功出力随机波动的关口无功趋优区间, 并根据半不变量法求解各个场景下区间的分布特性, 给定置信度进行典型区间的求取, 仿真结果表明:

- 1) 在各场景下本文所提趋优控制方法比传统方法降损 3% 左右。
- 2) 在连续波动场景下, 本文所提趋优控制方法的平均有功损耗比固定控制区间方法和优化功率因数控制方法下降 28%~35%, 优势明显。
- 3) 趋优控制作用下, 并网点电压曲线远离允许上限值, 更具安全性。

此外, 对于波动剧烈的大型陆上风电并网场景的电压控制, 由于影响机理相似, 本文所提方法同样适用。

参考文献

- [1] LI Qin hao, ZHANG Yongjun, JI Tianyao, et al. Volt/var control for power grids with connections of large-scale wind farms: a review[J]. IEEE Access, 2018, 6(1): 26675-26692.
- [2] SHAKIR D A, FAHAD S M, MD S, et al. Grid integration challenges of wind energy: a review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10857-10878.
- [3] 刘京波, 吴林林, 李琰, 等. 考虑风电运行轨迹与场景划分的场级主动调压优化控制策略[J]. 现代电力, 2024, 41(4): 612-621.
- LIU Jingbo, WU Linlin, LI Yan, et al. Optimal control strategy for field-level active voltage regulation considering wind power operation trajectory and scene division[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(4): 612-621.
- [4] 夏正龙, 陆良帅, 吴启凡, 等. 改进灰狼算法在含风电的配电网无功优化中的应用[J]. 智慧电力, 2023, 51(6): 63-70.
- XIA Zhenglong, LU Liangshuai, WU Qifan, et al. Application of improved grey wolf in reactive power optimization of distribution networks with wind power integration[J]. Smart Power, 2023, 51(6): 63-70.
- [5] 李大志, 周运斌, 赵瑞, 等. 特大城市电网基于统一全局优化的 AVC-DVC 电压优化控制模式的研究和应用[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2289-2294.
- LI Dazhi, ZHOU Yunbin, ZHAO Rui, et al. Research and application of AVC-DVC system based on global optimal control for super large-scale urban grids[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2289-2294.
- [6] GE Xiaolin, QIAN Jia, FU Yang, et al. Transient stability evaluation criterion of multi-wind farms integrated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3137-3140.
- [7] XUAN Peizheng, LIU Shangjia, ZHOU Qihang, et al. Simulation on multiple wind farm power series based on spatiotemporal Markov process[C] // 2023 2nd International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), August 25-27, 2023, Guangzhou, China: 149-155.
- [8] 肖浩, 裴玮, 董佐民, 等. 基于元模型全局最优化方法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5751-5762, 5931.
- XIAO Hao, PEI Wei, DONG Zuomin, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation using metamodel-based global optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5751-5762, 5931.
- [9] 罗培, 孙吉浩. 有源配电网动态无功优化解耦方法研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1323-1333.
- LUO Pei, SUN Jihao. Research on decoupling method for dynamic reactive power optimization of active distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1323-1333.
- [10] 杨铎炯, 俞靖一, 葛俊, 等. 海上风电场自适应多目标无功优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 121-129.
- YANG Duotong, YU Jingyi, GE Jun, et al. Adaptive multi-objective reactive power optimization control strategy for offshore wind farms[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 121-129.
- [11] 杨戴丞. 考虑风机无功调节能力的海上风电场无功优化及无功配置策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2024.
- YANG Daicheng. Research on reactive power optimization and reactive power compensation allocation strategy of offshore wind farm considering reactive regulation capabilities of wind turbine generators[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2024.
- [12] 陆振纲, 谢立军, 赵国亮, 等. 海上风电柔性低频送出系统无功电压协调控制策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3708-3720.
- LU Zhengang, XIE Lijun, ZHAO Guoliang, et al. Coordinated reactive power-voltage control strategy of flexible low-frequency transmission system for offshore wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3708-3720.
- [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.
- [14] 王德友, 王荀, 李远. 海上风电交流送出无功补偿配置方案研究[J]. 电工电气, 2023(11): 41-44, 56.
- WANG Deyou, WANG Xun, LI Yuan. Research on reactive power compensation configuration scheme of offshore wind power AC transmission[J]. Electrotechnics Electric, 2023(11): 41-44, 56.
- [15] 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, 15.
- 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, 15.
- [16] 李程昊, 蒋芒, 姚德贵, 等. 高比例可再生能源电力系统的日前-日内两级无功功率滚动调度方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 94-103.
- LI Chenghao, JIANG Mang, YAO Degui, et al. Day-ahead and intra-day two-stage reactive power rolling dispatch method for power systems with high renewable power penetration[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 94-103.
- [17] 齐金山, 姚良忠, 廖思阳, 等. 高比例新能源电力系统静态电压稳定裕度在线概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 47-57.
- QI Jinshan, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Online probabilistic assessment of static voltage stability margin

- for power systems with a high proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(5): 47-57.
- [18] 张勇军, 张豪, 唐捷. 小方式下省地电网无功电压调控的去失配策略[J]. *电网技术*, 2013, 37(1): 144-149.
ZHANG Yongjun, ZHANG Hao, TANG Jie. Anti-mismatch strategy for volt/reactive power control between provincial and district power networks under light load flow mode[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(1): 144-149.
- [19] 陈旭, 羿应棋, 张勇军. 考虑风电场随机波动性的变电站关口无功控制区间整定方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(15): 141-147.
CHEN Xu, YI Yingqi, ZHANG Yongjun. Setting method of reactive power interval for substation gateway considering stochastic volatility of wind farm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(15): 141-147.
- [20] 张勇军, 孙舒逸, 刘轩. 基于区域无功均分法的环网内变电站关口无功控制[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(9): 116-123.
ZHANG Yongjun, SUN Shuyi, LIU Xuan. Reactive power control based on ARPSM for substation gateway in loop network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(9): 116-123.
- [21] 黄伟, 刘斯亮, 羿应棋, 等. 基于光伏并网点电压优化的配电网多时间尺度趋优控制[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 92-100.
HUANG Wei, LIU Siliang, YI Yingqi, et al. Multi-time-scale slack optimal control distribution network based on voltage optimization for point of common coupling of PV[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 92-100.
- [22] 李钦豪. 考虑模型误差的无功电压全局优化控制和松弛趋优控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
LI Qin hao. Global optimal control and slack optimal control of reactive power and voltage considering model errors[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [23] 周保荣, 羿应棋, 黄廷城. 大方式下省地电网无功电压实时趋优控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(11): 126-133.
ZHOU Baorong, YI Yingqi, HUANG Tingcheng, et al. Real-time slack optimal method for voltage and reactive control between provincial and prefectural power networks in heavy load flow mode[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(11): 126-133.
- [24] 郭敬梅, 杜胜磊, 王红星, 等. 含多场控集成的海上风电场 DIgSILENT/PowerFactory 建模及实证技术研究[J]. *广东电力*, 2023, 36(10): 66-76.
GUO Jingmei, DU Shenglei, WANG Hongxing, et al. DIgSILENT/PowerFactory modeling and model verification research of offshore wind farm integrated with multiple station control functions[J]. *Guangdong Electric Power*, 2023, 36(10): 66-76.
- [25] 刘淑军, 郭铸, 黄伟煌, 等. 海上风电柔性直流输电系统新型电压-频率控制策略[J]. *广东电力*, 2022, 35(10): 12-19.
LIU Shujun, GUO Zhu, HUANG Weihuang, et al. New voltage/frequency control strategy in offshore wind power VSC-HVDC transmission system[J]. *Guangdong Electric Power*, 2022, 35(10): 12-19.
- [26] 卢睿, 熊小伏, 陈红州. 考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 13-24.
LU Rui, XIONG Xiaofu, CHEN Hongzhou. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering the spatial-temporal characteristics of a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 13-24.
- [27] 卫银忠, 苏嘉彬, 陈斌, 等. 基于 SVG 动态损耗模型的变电站无功补偿设备协同经济运行策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 177-187.
WEI Yinzong, SU Jiabin, CHEN Bin, et al. Cooperative economic operational strategy of substation reactive power compensation equipment based on an SVG dynamic loss model[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 177-187.
- [28] 李保罗, 徐式蕴, 李宗翰, 等. 基于贝叶斯深度学习的新能源多场站临界短路比区间预测方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5451-5463.
LI Baoluo, XU Shiyun, LI Zonghan, et al. Multiple renewable energy station critical short circuit ratio interval prediction method based on Bayesian deep learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(14): 5451-5463.
- [29] 范宏, 张艺, 金义雄. 基于半不变量法的随机潮流计算模型及方法[J]. *上海电力学院学报*, 2012, 28(4): 313-316.
FAN Hong, ZHANG Yi, JIN Yixiong. Study on electric power stochastic power flow model and method[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2012, 28(4): 313-316.
- [30] 刘昊, 王玮, 唐芬. 基于变功率因数的分散式风电场优化运行策略[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 387-395.
LIU Hao, WANG Wei, TANG Fen. Optimal operation strategy for dispersed wind farms based on variable power factor[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(2): 387-395.

收稿日期: 2024-07-14; 修回日期: 2024-11-05

作者简介:

肖红燕(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统并网; E-mail: 1594397489@qq.com

羿应棋(1990—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为配电网运行优化、配用电大数据分析; E-mail: yi_yingqi@foxmail.com

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统无功优化、智能配电网规划与运行优化等。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

(编辑 周金梅)