

DOI:10.11784/tdxbz202104010

基于鲁棒优化的风电场分层电压优化控制策略

马 明^{1,2}, 杜婉琳^{1,2}, 陶 然^{1,2}, 王 敏³, 廖 凯³

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510045;

2. 广东电网有限责任公司电能质量重点实验室, 广州 510045; 3. 西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

摘要: 随着新能源发电技术的不断发展, 风力发电技术受到全球的广泛关注。而风电场在运行时, 场内有功输出的不确定性以及无功调节装置间响应时间的差异导致系统电压控制困难的问题还尚未得到有效解决。因此, 制定一种基于鲁棒优化的风电场分层电压优化控制策略以提高电压控制效果用以解决此类问题。首先, 为了应对风电功率不确定性, 利用日前风电功率预测数据在日前优化阶段建立鲁棒优化模型, 该阶段在“最恶劣”的场景下, 通过对离散无功补偿装置和风机的无功出力进行协同优化, 得到离散无功补偿装置的次日投切计划。其次, 利用超短期风电功率预测数据以及全局信息, 在日内优化阶段建立风机无功出力优化分配模型, 对风机的无功出力进行优化分配, 并根据优化结果, 对其他动态无功补偿设备的无功出力进行设置, 分配结果传送至各设备控制器下进行相应的控制。最后, 通过在 MATLAB/Simulink 平台下建立双馈式风电场模型用以验证所提策略的有效性与优势。仿真结果表明, 与确定性控制策略相比, 所提策略能够降低因不确定因素导致电压违规的概率, 降低比例为 52.2%; 与传统的平均分配控制策略相比, 可以提高风机无功分配的合理性, 并降低 68.8 kW 功率损耗。所提策略可用于随机性较强情况下风电场内的电压控制。

关键词: 新能源发电; 风电场; 电压控制; 鲁棒优化; 分层控制

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1309-08

Hierarchical Voltage Optimal Control Strategy of Wind Farms Based on Robust Optimization

Ma Ming^{1,2}, Du Wanlin^{1,2}, Tao Ran^{1,2}, Wang Min³, Liao Kai³

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510045, China;

2. Key Laboratory of Power Quality, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510045, China;

3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: With the development of renewable energy generation and grid-connected technology, wind power generation technology has attracted worldwide attention. However, the uncertainty of the active power output and difference in the response time between voltage regulators lead to a difficult system voltage control, which has not been reasonably solved. To solve these problems, this study proposes a hierarchical voltage optimization control strategy based on robust optimization. First, to solve the uncertainty of wind power, a robust optimization model is established in the day-ahead optimization stage using the day-ahead wind power prediction data. In the *worst* scenario, the stage optimizes the reactive power output of the discrete reactive power compensation devices and wind turbines (WTs) and obtains the next-day switching plan of the discrete devices. Second, using global information and ultrashort-term prediction data, the optimal distribution model is established in the intraday optimization stage to optimize the distribution of WT's reactive power output. According to optimization results, the reactive power outputs of other dynamic reactive power compensation devices are set and transmitted to each device controller for corresponding

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-27.

作者简介: 马 明 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, sdmaming@126.com.

通信作者: 王 敏, wangmin_97@163.com.

基金项目: 广东电网有限责任公司科技资助项目 (GDKJXM20193404).

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

control. Finally, a model of a doubly-fed wind farm is established on the MATLAB/Simulink platform to verify the effectiveness and advantages of the proposed strategy. Simulation results show that compared with the deterministic control strategy, the proposed strategy can reduce the probability of voltage violation caused by uncertain factors by 52.2%. Compared with the traditional average distribution control strategy, the proposed strategy can improve the rationality of reactive power distribution and reduce the power loss by 68.8 kW. The proposed strategy can be used for voltage control in wind farms with high randomness.

Keywords: renewable energy generation; wind farm; voltage control; robust optimization; hierarchical control

十四五规划中,提出“碳达峰、碳中和”的概念,将新能源为主体的新型电力系统推上新的高度.风力发电作为可再生能源发电领域中技术最成熟、最具有商业化以及最具有发展潜力的发电方式之一,受到全球的广泛关注^[1].

然而,风力发电功率具有较强随机性和不确定性,这使得大规模的风电进入电网时,会影响电力系统安全、稳定运行.其中较为突出问题是风电场无功功率不足导致系统电压波动,严重时将导致系统电压崩溃和风电机组(wind turbine, WT)跳闸^[2],这给系统安全与经济运行带来了严峻的挑战.因此,需要一系列的策略用于无功控制以满足系统电压的稳定性要求,其中包括风电场的无功功率和公共耦合点(point of common coupling, PCC)的电压运行范围^[3].目前,电网规范中已经明确风电场无功控制的几种方法,主要包括功率因数控制、无功功率控制和电压控制.对于输电系统,电压控制方法表现出优越的性能,并且电压控制方案主要分为集中式、分散式和分布式 3 种控制方式^[4].

当采用分布式/分散式控制方法进行风电场内的电压控制时,可以使场内的控制响应速度较快,并且对通讯的要求较低.文献[5]将风电场各类设备数学模型归算至风机控制器中,使得在控制风机无功出力时,可以补偿设备的无功损耗以达到电压控制的目的.但这种方案需要精确的设备数学模型.考虑到区域通信链路的限制,文献[6]利用下垂控制对风机与无功补偿装置进行控制,该方法不需要设备的数学模型即可达到电压控制的目的,但是这种方法未能充分发挥出风机的无功调节能力,从而提高动态无功装置的运行成本.此外,还有学者提出一种两级分布式控制方法,根据相邻控制器之间的本地信息交换来调整其输出^[7].然而,考虑到上述方案的局部控制性质,它们无系统范围内的协调不能保证其最优控制.

相较于分布式/分散式控制方法,集中式电压无功控制方法基于系统全局信息协调多个无功补偿设备可实现全局优化的目标.文献[8-9]根据 PCC 电压

计算所需的无功量,然后按照等额或无功裕度的比例分配给每个风机控制器,尽管这些方法控制简单,但未考虑到风电场内风机的空间特性,以至于引起风机无功分配不合理的情况发生.而文献[10]提出了一种基于对偶分解的在线电压控制方案来优化装置的无功输出.然而由于慢动作装置不能在线及时调整,导致风电场内的快、慢动作装置不能有效协调.为此,文献[11]提出了一种基于模型预测控制的方法,该方法采用预测数据来解决快、慢动作装置不协调的问题,但是这种方法未考虑到预测数据的不确定性,导致该方法可能在风功率波动的场景下失效.

基于以上分析,为了降低风机出力不确定对控制的影响以及加强不同无功调节设备之间的协调,本文提出一种基于鲁棒优化的风电场分层电压优化控制策略,通过日前利用鲁棒优化方法和风功率分段模型调节慢动作设备的无功出力,降低不确定因素的影响,日内利用优化算法协调优化动态无功补偿装置的无功出力,提高无功分配的合理性,最终加强无功调节设备间的协调,实现风电场电压优化控制的目标.

1 风电场的电压控制系统

目前风电场通常采用两级升压模式,如图 1 所示,风电机组输出电压经过箱变进行升压后通过集电线路送入升压站进行二次升压,之后通过高压线路接入电网.而对于使用长电缆进行电力传输的风电场而言(如海上风电场),其因电缆对地电纳较大,导线路的充电功率增加,这使得系统电压波动更为严重^[12].本文考虑在这种场景下进行电压控制,因充电功率大,所以相应的离散无功补偿装置主要为并联电抗器组(shunt reactor bank, SRB),动态无功补偿装置主要为静止无功发生器(static var generator, SVG)和 WTs.但由于各种设备的无功响应时间不同,所以需要制定合理的电压控制策略,对设备间进行协调控制.

此外,中央控制器被设计为监控器,负责收集风电场系统的全局信息(包含 PCC 点电压、各台风机和

无功补偿装置的状态等信息)用于进行优化计算,并下发控制指令协调 SVG 以及 WT_s 无功出力以实现全局最优的电压控制目标。

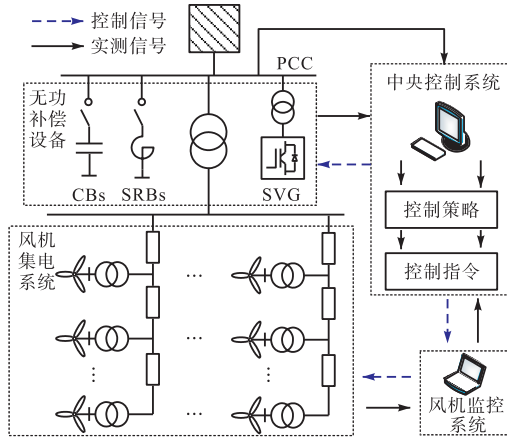


图1 电压控制系统示意
Fig.1 Diagram of voltage control system

2 分层电压优化控制策略

2.1 整体控制架构

本文提出一种基于鲁棒优化的风电场分层电压优化控制,其主要通过调节并联电抗器的投切组数以及协调优化 WT_s 与 SVG 的无功出力,来实现风电场的并网点电压控制.所提方法主要包含 2 个阶段,分别是日前优化调度阶段与日内优化控制阶段,如图 2 所示。

(1) 日前优化调度阶段:本阶段的主要是根据日前的风电功率预测数据,制定 SRBs 的次日投切计划,并传递到日内优化控制阶段.而此阶段,由于预测数据为日前预测,不确定性较为明显.因此,为了应对不确定性,以最小化系统功率损耗为目标,建立鲁棒优化模型.该模型在“最恶劣”的场景下,通过对无功补偿装置和风电机组的无功出力进行协同优化.并利用分段模型设置一日内的投切时间点 T_k 最终得到 SRBs 的次日投切计划。

(2) 日内优化控制阶段:本阶段的主要目的是根据上阶段所得到的 SRBs 的投切计划,并利用超短期风电功率预测数据以及风电场系统全局信息,建立风机无功出力优化分配模型(优化时间间隔为 T_{ss}).另外根据优化结果,对 SVG 的无功出力进行设置.最终结果传送至各控制器下进行无功控制。

以上两阶段相互配合,日前优化调度阶段为日内优化控制阶段提供 SRBs 的投切计划,而日内优化控制则在 SRBs 的投切计划的基础上,进行进一步的优化控制,以对日前优化调度阶段进行补偿。

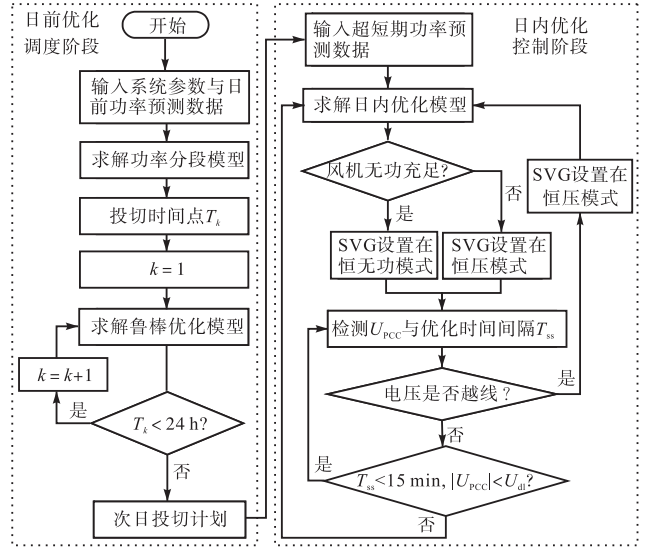


图2 分层电压整体控制流程
Fig.2 Flow chart of hierarchical voltage integrated control

2.2 日前优化调度阶段

为了降低风机出力波动对 SRBs 投切计划的影响,所以本节制定日前优化调度阶段.该阶段利用鲁棒优化模型和风电功率分段模型在不确定情景下,通过协调 SRBs 和 WT_s 的无功输出,得到 SRBs 的日运行调度计划.最后,将优化结果传输到第 2 阶段.注意,虽然 WT_s 在此阶段参与了优化,但它们的优化结果不会传输到下一阶段.WT_s 的无功出力将在第 2 阶段再次进行优化,以补偿第 1 阶段的决策。

2.2.1 鲁棒优化模型

在解决电力系统不确定性的方法中,随机优化和鲁棒优化是常用的方法.然而,与随机优化方法相比,鲁棒优化方法有着明显的优势^[13].因此,本文采用鲁棒优化方法对 SRBs 的投切计划在最坏情况下进行优化,最终确定 SRBs 第 2 天的运行计划.在所建立的鲁棒优化模型中,包含了决策变量 x (SRBs 的投入组数)、不确定参数 μ (风机有功出力)、可调变量 Q_w (风机无功出力)等参数和变量.该模型的目标函数考虑系统功率损耗,可表示为“最小-最大-最小”问题,即

$$\min_x \max_{\mu} \min_{Q_w, P, Q, V, I} \sum_{(i,j) \in Y} r_{ij} I_{ij}^2 \quad (1)$$

而模型中的约束条件主要包含风电场的潮流约束条件,即

$$\sum_{s \in \epsilon(j)} P_{js} = \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - r_{ij} I_{ij}^2) + P_j \quad (2)$$

$$\sum_{s \in \epsilon(j)} Q_{js} = \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - x_{ij} I_{ij}^2) + Q_j \quad (3)$$

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (4)$$

$$I_{ij}^2 = (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) / U_i^2 \quad (5)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, I_{ij}^{\min} \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max},$$

$$Q_{w,i}^{\min} \leq Q_i \leq Q_{w,i}^{\max} \quad (6)$$

式中: P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为节点 i 到 j 的有功和无功功率; s 为 j 的子节点; i 为 j 的父节点; P_j 和 Q_j 分别为节点 j 注入的有功和无功功率; I_{ij} 为支路 i 到 j 的电流; U_i 为节点 i 的电压幅值, r_{ij} 和 x_{ij} 分别为线路 i 到 j 的电阻和电抗; $\pi(j)$ 和 $\varepsilon(j)$ 分别为节点 j 所有父节点和子节点的集合; Y 为系统网络支路的集合, U_i^{\max} 和 U_i^{\min} 分别是节点 i 处允许电压上、下限; I_{ij}^{\max} 和 I_{ij}^{\min} 分别为支路 i 到 j 的允许电流上、下限; $Q_{w,i}^{\max}$ 和 $Q_{w,i}^{\min}$ 为第 i 台风机无功出力上、下限。

风电场中的 SRBs 不能频繁进行切换以及风功率应在一定范围内波动, 所以设置约束为

$$N_{\text{SRBs}}^{\min} \leq x \leq N_{\text{SRBs}}^{\max} \quad (7)$$

$$\mu_i \in [P_{\text{wpre-}i}^{24\text{h}} - \Delta\delta, P_{\text{wpre-}i}^{24\text{h}} + \Delta\delta] \quad (8)$$

式中: N_{SRBs}^{\max} 和 N_{SRBs}^{\min} 分别为 SRBs 的可控开关组数上、下限; μ_i 为考虑预测误差的风电功率; $P_{\text{wpre-}i}^{24\text{h}}$ 为风机有功出力的日前预测数据; $\Delta\delta$ 为预测数据误差。此外, 本文所采用的风机类型为双馈式风力发电机组, 而其无功出力极限值由文献[14]可得。

2.2.2 风电功率分段模型

由于风电场中的离散无功补偿设备不能频繁进行切换, 所以本文将 SRBs 一天的最大切换次数设置为 10 次。并且基于日前预测的风电功率数据建立分段模型来得到具体的投切时间点 T_k 。该模型最大程度地分散各段之间的平均风电功率, 并最小化分散各段内风机输出^[15], 模型为

$$\min_{T_k} \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{D+1} \|P_{w,tk} - P_{k,\text{mean}}\|_2^2 - \frac{1}{2} \|P_{k,\text{mean}} - P_{\text{mean}}\|_2^2 \quad (9)$$

$$1 \leq D \leq 10 \quad (10)$$

式中: $P_{w,tk}$ 为第 k 段内 t 时间点的风功率预测数据; P_{mean} 为每日 24 个时间段内的预测数据的平均值; $P_{k,\text{mean}}$ 第 k 段内预测数据的平均值; D 为投切次数。

2.3 日内优化控制阶段

日内优化控制阶段利用风机无功优化分配模型在更短的时间间隔内使系统功率损耗最小化, 得到 WTs 无功出力, 并根据优化结果对 SVG 制定工作模式。该阶段是对日前优化阶段的补偿, 并且用以加强各无功调节设备间的协调。

2.3.1 风机无功优化分配模型

在日内优化阶段运行之前获得风电功率的 15 min 的点预测数据。风机的无功分配优化模型为

$$\min_{\mu, Q_w, P_{ij}, Q_{ij}, V_i, J_{ij}} \sum_{(i,j) \in N} r_{ij} I_{ij}^2 \quad (11)$$

由于这些预测数据在较短的时间内获得, 并且比第 1 阶段的预测数据更准确, 认为第 1 阶段的不确定性已经得到解决。所以对于参数 μ_i 不考虑其不确定性, 无功优化分配模型的约束条件除了式(2)~式(6)外, 还需添加

$$\mu_i = P_{\text{wpre-}i}^{15\text{min}} \quad (12)$$

式中 $P_{\text{wpre-}i}^{15\text{min}}$ 为风机有功出力的超短期预测数据。

2.3.2 SVG 的无功分配策略

通过求解上述优化模型, 可以得到 WTs 的无功输出指令。然后, 根据优化结果和并网点电压的实时检测信息设置 SVG 工作模式, 如图 3 所示。如果风机的无功裕度 Q_m 足够, SVG 的工作模式设置为恒无功模式; 如果风机的无功输出达到极限或并网点电压处在规定允许范围之外, SVG 的工作模式设置为恒压模式。

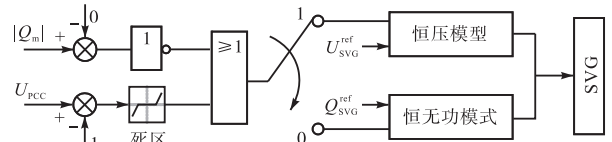


图 3 SVG 的无功分配策略

Fig.3 Reactive power allocation strategy of SVG

本文到考虑风功率、电网电压等因素会频繁出现小波动, 导致风电场并网点电压也会随之出现小范围的波动, 因此为防止风机无功出力的频繁波动和频繁地进行无功优化计算, 提升无功控制的效率, 本文设置无功优化计算死区范围。如果 U_{PCC} 在死区范围内, 则在一定周期内进行一次优化计算。当 U_{PCC} 超出死区范围时, 则对风机无功出力进行优化。

3 模型的求解方法

本文的模型中非凸方程通过二阶锥规划进行转化, 并利用列与约束生成 (column and constraint generation, C&CG) 算法求解鲁棒优化模型。

3.1 二阶锥规划

在第 2 节建立的鲁棒优化模型和风机无功优化分配模型中, 其约束条件都含有非线性非凸方程, 这导致优化模型是一个混合整数非线性非凸规划问题, 若对此不加以处理, 模型很难获得全局最优解。因此, 本文采用二阶锥规划对优化模型中的非凸方程进行转换。与原来的混合整数非线性非凸规划相比, 变换后的方程是一个混合整数凸规划, 可以利用一些商

业求解器进行快速且准确的求解^[16]。

采用二阶锥规划方法对上述模型中的非线性目标函数和约束条件进行线性化. 其利用 $I_{p,ij}$ 和 $U_{p,i}$ 替换二次项 I_{ij}^2 和 U_i^2 的形式对目标函数和约束条件进行二阶锥转换. 替换结果为

$$\begin{cases} \sum_{s \in \mathcal{E}(j)} P_{js} = \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij} - r_{ij} I_{p,ij}) + P_j \\ \sum_{s \in \mathcal{E}(j)} Q_{js} = \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij} - x_{ij} I_{p,ij}) + Q_j \\ U_{p,j} = U_{p,i} - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{p,ij} \\ P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 = I_{p,ij} U_{p,i} \\ (U_i^{\min})^2 \leq U_{p,i} \leq (U_i^{\max})^2, (I_{ij}^{\min})^2 \leq I_{p,ij} \leq (I_{ij}^{\max})^2 \end{cases} \quad (13)$$

但对于约束 (13) 中的第 4 个方程, 它仍然是一个非凸二次方程. 但其可以通过二次松弛化为不等式, 得到

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq I_{p,ij} U_{p,i} \quad (14)$$

其等效变换可得

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} & 2Q_{ij} & I_{p,ij} - U_{p,i} \end{bmatrix} \right\|_2 \leq I_{p,ij} + U_{p,i} \quad (15)$$

因此, 不等式 (14) 可以重写为标准的二阶锥公式. 变换后, 用不等式 (15) 代替约束 (13) 中的第 4 个等式.

3.2 列与约束生成算法

在上述二阶锥变换的基础上, 对所提策略中的鲁棒优化模型进行了进一步的处理, 可以表示成紧凑矩阵形式为

$$\min_x \max_{\mu} \min_y a^T y \quad (16)$$

$$\begin{cases} Ax \leq a, By \leq f, Dy = \mu \\ Ey + Fx = d, \|Q_i y\|_2 \leq c_i^T y, \mu \in W \end{cases} \quad (17)$$

式中: y 为式 (1) 等价过后的变量集; $A, B, D, E, F, Q_i, a, f, d, c_i$ 均为等价过后的系数矩阵; W 为不确定集. 其中, 约束 (7)、(8)、(13) 等同于约束 (17). 对于式 (16) 和式 (17), 可将其分解为主、子问题进行求解^[17], 随后可用 C&CG 算法进行迭代求解主问题和子问题, 直到主问题得出解的下界 LB 和子问题得出解的上界 UB 之间的差距减小到允许的终止阈值, 具体流程如图 4 所示.

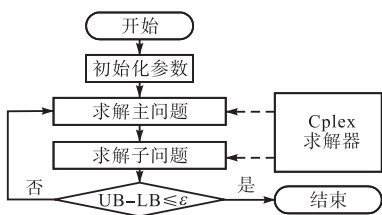


图 4 C&CG 算法流程

Fig.4 Flow chart of C&CG algorithm

根据上述步骤求解完后得出电抗器组的次日日内投切计划.

4 算例仿真与分析

图 5 所示的风电场发电系统用于测试所提策略的有效性. 表 1 列出了模拟中使用的风电场参数.

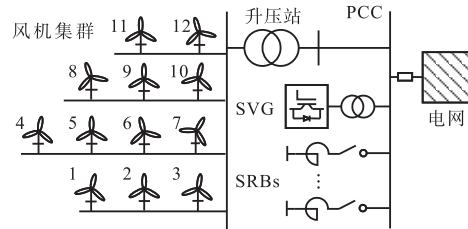


图 5 风电场发电系统示意

Fig.5 Diagram of wind farm power generation system

表 1 风电场系统参数

Tab.1 Wind farm system parameters

参数	含义	数值	单位
S_N	风机视在功率	4	MV · A
P_N	风机额定有功	3.6	MW
U_{SN}	风机额定定子电压	0.69	kV
x_s	风机定子漏抗	0.171	p.u.
x_r	风机转子漏抗	0.156	p.u.
x_m	风机励磁电抗	2.9	p.u.
r	输电线路电阻	0.018 7	Ω/km
C	输电线路电容	0.202	$\mu\text{F}/\text{km}$
L	输电线路电感	1.394	mH/km

在 PCC 处设置了集中式无功补偿装置 (包括 SRBs 和 SVG), 以配合 WTs 调整并网点电压. 其中有 5 组 SRBs 和一套 SVG. 每组 SRB 的无功容量为 4 Mvar, SVG 的可调无功在 ± 72 Mvar 之间. 网点电压的允许范围在 0.97 ~ 1.07 p.u. 之间. 无功优化计算死区范围设置为电压参考值的 ± 0.01 p.u. 之间.

为了合理验证所提策略的有效性和优势, 针对以下不同控制策略进行对比分析.

策略 1 用本文所提策略进行风电场的电压控制.

策略 2 利用确定性模型进行优化调度, 不考虑风电功率的不确定性, 日内控制使用该优化结果进行控制.

策略 3 在日前阶段使用鲁棒优化方法对离散无功补偿设备进行优化调度, 而在日内阶段按等比例对风机的无功出力进行分配.

4.1 仿真结果分析

考虑到风电场风速随时间变化, 为了减少 SRBs 切换次数, 根据第 2.2.2 节所述的分段方法对风电功率预测曲线进行了分段, 分段结果如图 6 所示.

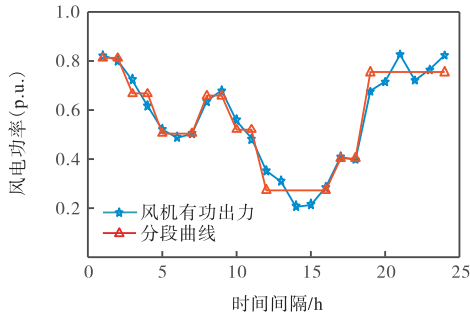


图 6 预测数据分段结果

Fig.6 Segmentation results of prediction data

根据分段结果,求解鲁棒优化模型得出电抗器的日内投切计划,如表 2 所示.

表 2 SRBs的次日投切计划

Tab.2 Next-day switching plan of SRBs

时间段	$Q_{SRBs}/Mvar$
01:00—05:00,08:00—12:00,19:00—24:00	16
05:00—08:00,12:00—19:00	20

根据上述方法设置 SRBs 投切可以为风电场的电压控制带来以下优势:一方面,当风电功率发生变化时,可以提前调整 SRBs 的无功输出 Q_{SRBs} ,提高系统的稳定性.另一方面,得到一天内 SRBs 切换的时间点,可以提高 SRBs 切换的效果,减少切换次数.

为了验证所提策略的有效性,对该策略进行动态仿真.在仿真中,将日内优化阶段的周期缩短至一个周期 30 s 以提高仿真效率.其中风功率在 55 s 和 85 s 时波动 1 次;设置电网电压在不同时间波动,并且波动程度不同.仿真结果如图 7 所示,其中包括 12 台风机的无功出力 and 并网点电压的动态曲线.

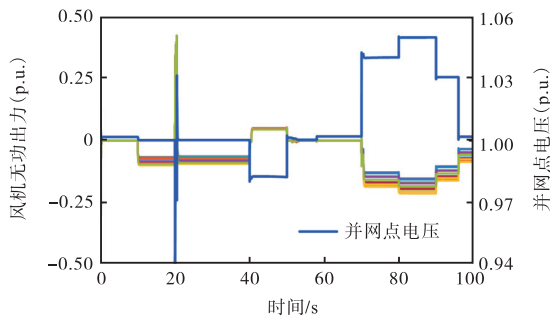


图 7 所提策略的动态仿真结果

Fig.7 Dynamic simulation results of the proposed strategy

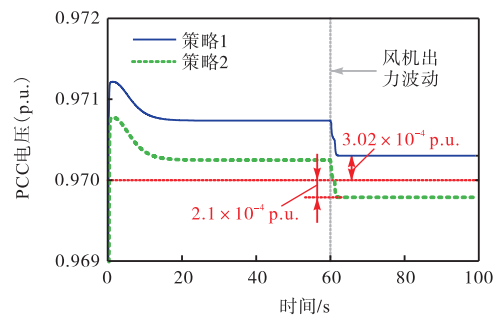
由图 7 可以看出,所提策略能够根据风机的有功出力(55 s 和 85 s)的变化调整风机无功出力.而且针对电网波动引起的风电场电压波动,所提策略可以及时调整电压控制装置的无功功率输出,以满足并网点电压的控制目标要求.此外,当并网点电压超过限值(20.0 ~ 20.5 s 期间),所提策略可以快速调整 WTs 和

SVG 的无功输出,使并网点电压恢复到允许范围内.因此,采用所提的电压控制策略,可以在各种情况下,使并网点的电压快速恢复到规定范围,从而保证风电场稳定运行.

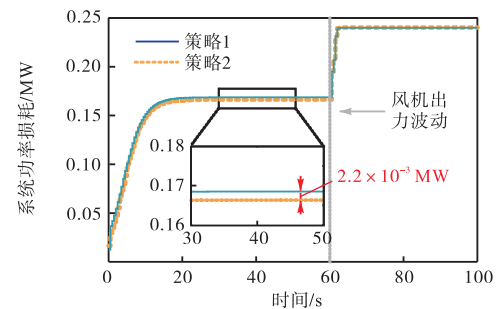
4.2 不同控制方法对比

本节利用策略 1 与策略 2 的对比,分析利用鲁棒优化方法处理不确定性的优势,并且利用策略 1 与策略 3 对比,分析日内优化控制的优势.

图 8 为某一预测风功率条件下策略 1 与策略 2 的并网点电压曲线和系统功率损耗曲线.图中,60 s 前为恒定预测功率下的曲线,60 s 后为风功率波动到“最恶劣”情况时的曲线.



(a) 并网点电压曲线



(b) 系统功率损耗曲线

图 8 策略 1 与策略 2 的仿真结果

Fig.8 Simulation results of strategies 1 and 2

由图 8 可以看出,在 60 s 前,两种策略控制下的并网点都在规定的允许范围内,并且在这段时间内,策略 1 的功率损耗虽然要比策略 2 的要高 2.2 kW,但差距较小.而在 60 s 后,风功率开始波动,当波动到最恶劣的情况,利用策略 2 控制下的并网点电压已经越下限,而策略 1 控制下的并网点电压要高于下限值 3.02×10^{-4} p.u.,具有一定的裕度.结果表明策略 1 比策略 2 的控制效果要好.

为进一步说明策略 1 的优势,本节利用蒙特卡洛算法随机生成 500 个风机有功出力波动的场景.根据预测数据,风机有功出力波动范围为 $\pm 20\%$,并服从正态分布.表 3 为两种控制策略下的控制结果.由表 3 可以看出,虽然使用鲁棒优化模型进行优化会使风

电场系统的功率损耗增加,但是可以降低并网点的电压偏差和电压违规率.结果表明,策略1能够有效地降低风功率不确定性带来的危害,以及提高系统的安全性.

表3 随机场景下的控制结果

Tab.3 Control results in random scenes

策略	平均功率损耗/MW	电压偏差绝对值(p.u.)	电压违规率/%
1	0.178 8	0.029 60	0
2	0.176 9	0.030 04	52.2

图9为模拟某段时间内策略1与策略3的并网点电压、风机无功出力(以第4号和第10号风机为例)以及系统功率损耗曲线.模拟条件与第4.1节的调节一致.而策略3所使用等比例分配方法,其电压参考值每30s更新1次.

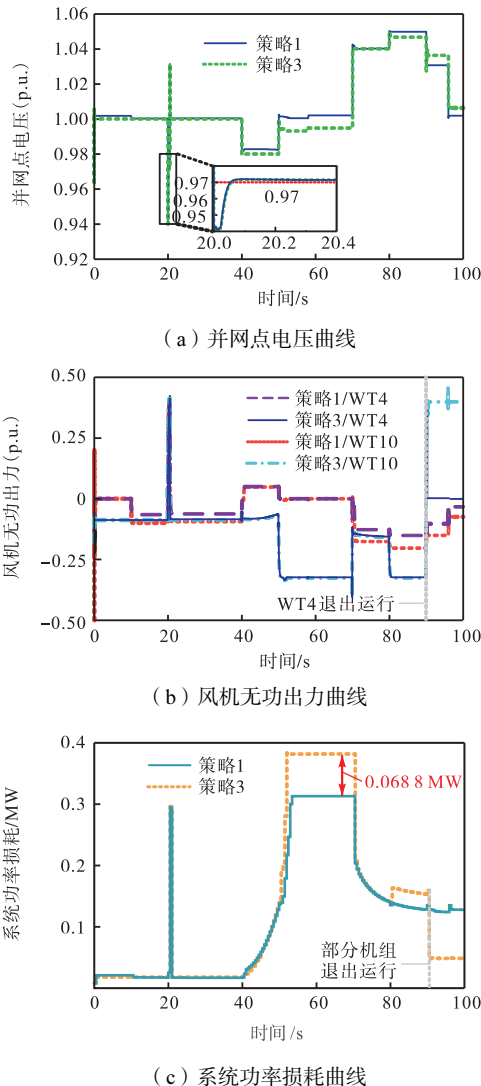


图9 策略1与策略3的仿真对比结果

Fig.9 Simulation results of strategies 1 and 3

根据图9(a)可以看出,两种控制方式都可以有

效地将电压控制在规定范围内.但根据图9(b)可以看出,策略1控制下的风电机组无功出力波动较小,而策略3控制下的风机的无功出力波动较大.并且结合图9(b)、(c)可以看出,在55~70s时间段内,策略3控制下风机的无功出力不合理,导致系统的功率损耗上升,损耗增加0.0688MW.而在90s时,因为策略3没有考虑风机的空间特性影响(尾流效应、线路长度等影响),导致4号风机的无功出力(见图9(b)蓝色曲线)过大而退出运行.而策略1控制下的风电场还能正常运行.上述结果表明:所提策略一方面可以合理地利用风电机组的无功资源以减少风电场的功率损耗;另一方面还可以考虑到风机的无功出力特性,降低因无功过出力而导致风机退出运行的发生概率.

5 结论

- (1) 所提策略可以提前得到次日SRBs切换的时间点与投切组数,提高SRBs投切的控制效果,减少切换次数.降低因风机出力不确定性而导致系统电压违规的概率,在某一随机场景下,降低的比例为52.2%.
- (2) 所提策略使风电场内不同无功调节设备间能够进行协调配合,合理解决因无功调节设备响应时间不同而导致电压控制困难的问题.
- (3) 所提策略可提高风电场内风机无功出力的合理性,降低系统68.8kW的功率损耗,并且能够避免因无功过出力而导致风机退出运行.

参考文献:

[1] 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).

[2] Pathak A K, Sharma M P, Bundele M. A critical review of voltage and reactive power management of wind farms[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 460-471.

[3] Guo Y F, Gao H L, Xing H, et al. Decentralized coordinated voltage control for VSC-HVDC connected wind farms based on ADMM[J]. IEEE Transactions on Sus-

- tainable Energy, 2019, 10(2): 800-810.
- [4] Asadollah S, Zhu R W, Liserre M. Analysis of voltage control strategies for wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 1002-1012.
- [5] Asadollah S, Zhu R W, Liserre M, et al. Decentralized reactive power and voltage control of wind farms with type-4 generators[C]// 2017 IEEE Manchester PowerTech. Manchester, UK, 2017: 1-6.
- [6] 沈阳武, 梁利清, 张 斌, 等. 基于改进灵敏度算法的风电场分层协调优化控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 28-33, 41.
Shen Yangwu, Liang Liqing, Zhang Bin, et al. A hierarchical control strategy for wind farms based on improved sensitivity algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2020, 32(9): 28-33, 41(in Chinese).
- [7] Robbins B A, Hadjicostis C N, Dominguez-Garcia A D. A two-stage distributed architecture for voltage control in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1470-1482.
- [8] 张学广, 刘义成, 海 樱, 等. 改进的配电网双馈风电场电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 29-35.
Zhang Xueguang, Liu Yicheng, Hai Ying, et al. Improved voltage control strategy of doubly-fed induction generators wind farm in distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 29-35(in Chinese).
- [9] Karthikeya B R, Schütt R J. Overview of wind park control strategies[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 416-422.
- [10] Guo Y F, Gao H L, Wang Z Y. Distributed online voltage control for wind farms using generalized fast dual ascent[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4505-4517.
- [11] 张 哲, 王成福, 董晓明, 等. 基于分层模型预测控制的风电场电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 34-42, 94.
Zhang Zhe, Wang Chengfu, Dong Xiaoming, et al. Coordinated voltage control strategy of wind farms based on hierarchical model predictive control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 34-42, 94(in Chinese).
- [12] 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).
- [13] An Y, Zeng B. Exploring the modeling capacity of two-stage robust optimization: Variants of robust unit commitment model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 109-122.
- [14] 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).
- [15] 张佳琪. 考虑双馈风电场无功调节能力的无功电压协调控制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
Zhang Jiaqi. Research of Coordinated Control of Reactive Voltage Considering Reactive Power Regulation of DFIG Wind Farm[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017(in Chinese).
- [16] 丛鹏伟, 唐 巍, 娄铨伟, 等. 含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1263-1272.
Cong Pengwei, Tang Wei, Lou Chengwei, et al. Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high penetration renewable energy generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1263-1272(in Chinese).
- [17] Ding T, Liu S Y, Yuan W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.

(责任编辑: 孙立华)