

计及无功资源调配成本的风电场优化技术

胡 畔¹, 丁 凯¹, 江克证¹, 张兆毅², 赖秋频², 刘承锡²

(1.国网湖北省电力有限公司电力科学研究院, 湖北 武汉 430077; 2.武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 文章提出了一种计及无功资源调配成本的风电场无功优化方法, 实现了风电场在不同运行工况下的无功优化配置。该方法以风电场无功调配成本和网损组成的综合成本最小为目标函数, 考虑风电功率波动对系统电压的影响, 建立基于机会约束规划的风电场无功优化模型, 采用改进内点法进行求解。所提方法通过设置无功成本系数, 使风电场能够按实际运行需求调用静止无功发生器、储能设备和风机的无功, 并优化风电场网损。通过在电压约束条件中预留电压安全裕度防止系统电压发生越限。在某实际风电场中验证了所提方法的可行性和优越性。

关键词: 无功优化; 网损; 风电功率波动; 无功资源调配; 电压越限

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)04-0522-08

0 引言

随着“碳达峰, 碳中和”目标的提出, 我国的可再生能源发电并网进入高速发展时期^[1]。风电作为主要的可再生能源之一, 提升其在电网中的渗透率对改善我国能源结构和减少碳排放具有重要意义^[2]。

当大量风电接入电力系统后, 风电波动会引起电压波动甚至电压越限问题, 严重影响电力系统的安全稳定运行^[3]。随着风电场规模的增大和系统网损的增加, 通过无功优化降低风电场网损的研究得到了越来越多的关注。新型风电场在满足最大风能利用的同时, 还需要为所接入的电力系统提供各种辅助服务, 如无功支撑、电压调节、频率响应、惯量支撑等^[4], 其中的无功支撑能力对电力系统电压安全具有重要作用。目前, 许多以网损最小为目标的无功优化控制方法已被广泛应用于提高风电场运行的经济性。文献[5]提出了一种风电场无功分配策略, 减小因无功功率在风电场内部流动引起的有功损耗, 利用粒子群优化方法求解优化模型, 实现各风机的无功合理分配。文献[6]提出了一种新型的双馈风电场无功优化分配策略, 以降低风电场整体损耗为目标, 并考虑风机内部能量转换系统的损耗, 从而实现风电场无功的优化配置。为提高风电场运行的系统稳定性, 一

些以电压为研究对象的无功优化控制方法成为研究热点。文献[7]通过检测并网点电压、控制网侧变换器调节网侧无功分量, 进而满足电压波动场景下的电网无功需求。文献[8]针对弱联接风电场并网点电压波动问题, 提出了一种在电压跌落时机组发出无功以稳定电压的无功控制模式, 充分发挥了双馈风电场的无功能力。为了兼顾风电场运行的经济性和安全性, 许多学者提出了多目标的优化方法。文献[9]以平均电压偏移和网损最小为优化目标, 建立无功补偿优化模型, 采用基于分解的多目标优化算法求解, 得到负荷分段结果及各分段对应的最优补偿方案。文献[10]提出了以网损、电压偏差、静态电压稳定裕度等最小为目标的无功优化模型, 通过求解可快速获得电网中各无功设备的优化控制。上述文献以不同的目标函数对风电场无功优化控制方法进行了研究, 而考虑无功资源调配成本的风电场无功优化控制问题鲜有提及。在实际工程应用中, 风电场往往需要根据不同运行工况需求, 按照不同优先顺序调用场站无功。有的风电场运行工况要求优先调用无功发生器(SVG)的无功容量, 从而使风机容量能够充分发出有功功率; 有的风电场运行工况要求优先调用风机的剩余无功容量, 而预留尽量多的SVG无功容量, 满足系统故障穿越的无功备用需

收稿日期: 2023-02-17。

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGHBDK00DWJS2100057)。

通信作者: 刘承锡(1985-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、稳定与控制。E-mail: liuchengxi@whu.edu.cn

求^[1]。随着风电快速发展,储能设备(ES)被广泛用来平抑风电功率的波动和提高新能源场站对电网的频率和惯量支撑作用,由于储能设备具有四象限运行功能,使其具备一定的无功调节能力,因此,储能设备也可参与风电场的无功优化^[2]。

本文提出一种计及无功资源调配成本的风电场无功优化方法,在满足上级调度无功指令要求下,使风电场能够根据实际运行工况需要,按一定优先级顺序调用 SVG 无功、ES 无功和风机无功,并优化风电场网损。首先,以风电场无功成本和网损组成的综合成本最小为目标函数,建立基于机会约束规划的无功优化模型;其次,设置不同的无功成本系数使风电场按照一定优先级调配无功资源,并在电压约束条件中引入电压安全裕度防止电压发生越限;再次,采用改进内点法求解无功优化模型,实现风电场无功的优化配置;最后,在某实际风电场验证了所提模型的可行性和优越性。

1 风电场优化模型

本文以风电场无功成本和网损组成的综合成本最小为目标函数,考虑风电不确定性对系统电压的影响,基于机会约束规划建立无功优化模型,并采用改进内点法求解模型。通过在电压约束条件中预留电压安全裕度,防止因风电功率波动可能导致的电压越限。

1.1 目标函数

本文所建立的无功优化模型以风电场无功成本和网损组成的综合成本最小为目标函数,其表达式为

$$f_1=c_1Q_S+c_2Q_E+c_3\sum_{i=1}^{ng}Q_i+f_2, i \in B_{ng} \quad (1)$$

式中: f_1 为综合成本; f_2 为网损成本; ng 为风机总数; B_{ng} 为所有风机集合; c_1, c_2 和 c_3 分别为 SVG、ES 和风机的无功成本系数; Q_S, Q_E 分别为 SVG 和 ES 所发出的无功功率; Q_i 为第 i 台风机发出的无功功率。

无功成本包括 SVG 无功成本、ES 无功成本和风机无功成本,而网损由并联部分网损和串联部分网损组成,其表达式为

$$f_2=\sum_{l=1}^{n_l}\left[\frac{V_i^2}{k_l^2}+V_j^2-2\frac{V_i}{k_l}V_j\cos(\theta_i-\theta_j-\theta_{shif,l})\right]G_l+$$

$$\sum_{i=1}^n V_i^2 G_i^0, i, j \in B, l \in B_l \quad (2)$$

式中: n_l 为总支路数; n 为总节点数; k_l 为含变压器支路的变比, $\theta_{shif,l}$ 为变压器的相移角,其一次侧取支路始端节点,对于不含变压器的回路, $k_l=1, \theta_{shif,l}=0$; i 和 j 分别为支路 l 的始端和末端节点序号; V_i 和 θ_i 分别为节点 i 的电压幅值和相角; G_l 为支路 l 的电导; G_i^0 为节点 i 对地电导; B 为所有节点集合; B_l 为所有支路集合。

值得注意的是,若式(1)中 $c_1=c_2=c_3=0$,则所建立的无功优化模型的目标函数为网损 f_2 最小。

1.2 约束条件

本文所建立的无功优化模型的等式约束条件为各节点有功功率平衡方程和无功功率平衡方程:

$$P_{gen,i}-P_{load,i}-V_i\sum(V_jG_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij})=0, i, j \in B \quad (3)$$

$$Q_{gen,i}-Q_{load,i}-V_i\sum V_j(G_{ij}\sin\theta_{ij}-B_{ij}\cos\theta_{ij})=0, i, j \in B \quad (4)$$

式中: $P_{gen,i}, P_{load,i}$ 分别为 i 节点的有功功率和有功负荷; $Q_{gen,i}, Q_{load,i}$ 分别 i 节点的无功功率和无功负荷; θ_{ij} 为 i 节点和 j 节点的相角差; G_{ij}, B_{ij} 分别为节点导纳矩阵对应元素的实部和虚部。

不等式约束条件包括线路传输功率约束、并网点无功指令约束、SVG 无功约束、ES 无功约束、风机无功约束以及系统状态变量约束条件,其表达式分别为

$$S_l \leq S_{l,max}, l \in B_l \quad (5)$$

$$Q_{slack}=Q_{com} \quad (6)$$

$$Q_{S,min} \leq Q_S \leq Q_{S,max} \quad (7)$$

$$Q_{E,min} \leq Q_E \leq Q_{E,max} \quad (8)$$

$$Q_{i,min} \leq Q_i \leq Q_{i,max}, i \in B_{ng} \quad (9)$$

$$V_{i,min}+\Delta V_i \leq V_i \leq V_{i,max}-\Delta V_i, i \in B \quad (10)$$

$$\theta_{i,min} \leq \theta_i \leq \theta_{i,max}, i \in B \quad (11)$$

式中: S_l 为第 l 支路传输功率,其最大传输容量为 $S_{l,max}$; Q_{slack} 为风场接入交流电网节点的无功功率,其值恒等于上级下发的无功指令 Q_{com} ; $Q_{S,max}, Q_{S,min}$ 分别为 SVG 所能发出无功的上、下限; $Q_{E,max}, Q_{E,min}$ 分别为 ES 所能发出无功的上、下限; $Q_{i,max}, Q_{i,min}$ 分别为风机 i 所能发出无功的上、下限; $V_{i,max}, V_{i,min}$ 分别为第 i 节点电压幅值的上、下限; ΔV_i 为 i 节点电压幅值安全裕; $\theta_{i,max}, \theta_{i,min}$ 分别为 i 节点电压相角的上、下限。

由于风电的随机性和间歇性,风机功率存在一定的不确定性,在实际运行中可能引发电压越限现象。因此,本文通过在电压约束条件式(10)中预留电压幅值安全裕度 ΔV_i ,防止可能发生的电压越限。本文采用改进内点法求解式(1)~(11)所构建的基于机会约束规划的风电场无功优化模型。

2 风电不确定性的转化

由概率论定理推论可知,多元正态分布的任意线性组合服从一维正态分布。本文假设风机的功率预测误差均服从多元正态分布,风电场时空相关系数矩阵为

$$C_p = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{1,2} & \dots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & 1 & \dots & \rho_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n,1} & \rho_{n,2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: C_p 为风电场不平衡功率的相关系数矩阵; $\rho_{i,j}$ 为*i*节点和*j*节点不平衡功率间的相关系数。

进而可得风场的协方差矩阵为

$$R = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n]^T \times C_p \times [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n] \quad (13)$$

式中: δ_i 为第*i*个节点不平衡功率的标准差,对含有风机节点,其值为风机功率预测误差的标准差,对无风机的节点其值为0。

首先,在某一运行点附近,风机的不平衡功率经过灵敏度矩阵 S_{VP} 的线性仿射变换得到电压幅值的不平衡量:

$$\Delta V = S_{VP} \times \Delta P \quad (14)$$

式中: S_{VP} 为节点电压幅值对节点有功的灵敏度系数矩阵; ΔP 为节点有功功率。

然后,考虑不同风机的功率预测误差存在时空相关性,求得各节点电压不平衡量的方差 $\delta_{\Delta V_i}^2$:

$$\delta_{\Delta V_i}^2 = [S_{VP,i,1} \ S_{VP,i,2} \ \dots \ S_{VP,i,n}] \times R \times [S_{VP,i,1} \ S_{VP,i,2} \ \dots \ S_{VP,i,n}]^T, i=B \quad (15)$$

式中: $S_{VP,i,j}$ 为*i*节点电压对*j*节点有功的灵敏度系数。

进而得到各节点电压幅值不平衡量的正态分布函数:

$$\Delta V_i \sim N(\overline{\Delta V_i}, \delta_{\Delta V_i}^2), i=B \quad (16)$$

式中: $\overline{\Delta V_i}$ 为*i*节点电压幅值不平衡量的平均值; $N(x)$ 为标准正态分布函数。

最后,计算置信度 β 的电压不平衡量 ΔV_i :

$$2\Phi\left(\frac{\Delta V_i - \overline{\Delta V_i}}{\delta_{\Delta V_i}}\right) - 1 \geq \beta, i \in B \quad (17)$$

式中: Φ 为一定电压波动的概率函数;置信度 β 对应*i*节点电压不平衡幅值不大于 ΔV_i 的概率。

作为*i*节点的电压安全裕度,将其代入电压约束条件式(10)中,即通过预留电压安全裕度防止系统电压发生越限。式(17)中, β 取值越大,在电压约束条件中需要预留的电压安全裕度也越大,从而系统电压越安全。

3 风电场无功优化配置方法

为了保证电力系统运行的安全性和经济性,在不同风电场运行工况下,风电场无功调用优先顺序也将不同。在风场资源较丰富时,为了使风机容量能够充分用于发出有功功率,要求风电场优先调用SVG无功容量,充分利用ES无功调节能力,而尽量不占用风机容量。只有当SVG和ES无功容量不满足风电场无功需求时,才调用风机无功资源。在风电场可能发生故障的工况下,要求优先调用风机的无功容量,而尽量预留SVG无功容量,满足风电场故障穿越所需的无功备用需求和快速响应能力。

本文针对含SVG,ES的风电场,提出计及无功调配成本的风电场无功优化方法,如图1所示。

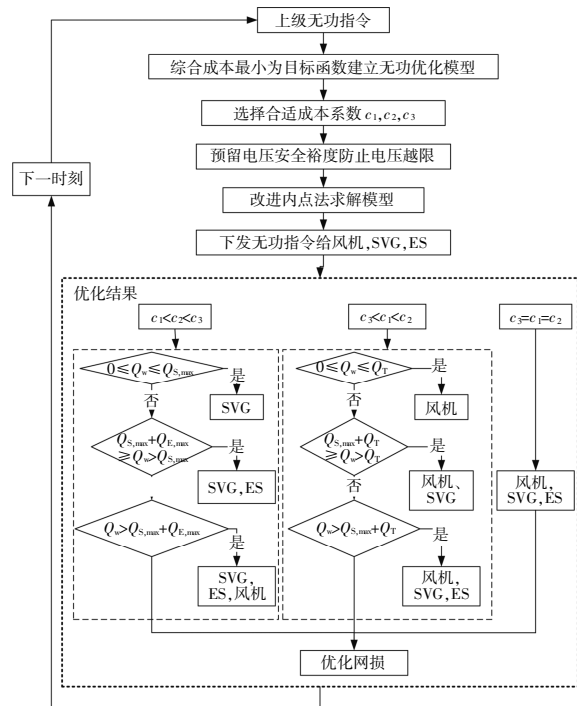


图1 风电场无功调配流程图

Fig.1 Flow chart of reactive power scheduling in wind farm

首先建立以风电场综合成本最小为目标函数的基于机会约束规划优化模型;然后通过选取适当的无功成本系数 c_1, c_2 和 c_3 ,使风电场能够根据不同运行工况需求,按成本系数从低到高的优先级顺序调配无功资源;其次,在电压约束条件中预留电压安全裕度,防止因风电功率波动可能引起的电压越限;最后采用改进内点法求解模型,将优化后的无功指令下发给各个无功源,实现风电场无功优化配置。所提无功优化方法能够按实际工程需要有序调配风电场无功,优化风电场网损和防止系统电压发生越限。本文以风电场总无功需求 $Q_w > 0$ (发出无功功率) 为例进行说明,同理可得风电场总无功需求 $Q_w < 0$ (吸收无功功率) 的优化结果,此处不再赘述。

为了使风机容量充分产生有功功率,通过选取合适的成本系数,并满足 $c_1 < c_2 < c_3$ (设为 A 运行方式),实现风电场无功的优化配置。当风电场总无功需求 $Q_w \leq Q_{s,max}$ 时,风电场优先调用 SVG 无功,因为 SVG 无功成本系数最低;当 $Q_{s,max} < Q_w \leq Q_{s,max} + Q_{e,max}$ 时,调用全部 SVG 无功容量和部分 ES 无功容量;当 $Q_{s,max} + Q_{e,max} < Q_w$ 时,调用全部的 SVG, ES 无功容量,不足的风电场无功由风机发出。

为了使风电场在可能发生故障的工况下,拥有足够的快速响应无功备用容量,通过选取合适的成本系数,并满足 $c_3 < c_1 < c_2$ (设为 B 运行方式),实现风电场无功的优化配置。当 $Q_w \leq Q_T$ 时,风电场优先调用风机无功容量,因为风机的成本系数

最低,其中 Q_T 是某时刻所有风机具备的总无功能力;当 $Q_T < Q_w \leq Q_T + Q_{s,max}$ 时,调用全部的风机无功容量和部分 SVG 无功容量;当 $Q_T + Q_{s,max} < Q_w$ 时,调用全部的风机和 SVG 无功容量,不足的无功由 ES 发出。

同理,通过选取合适的无功成本系数可得其他调用顺序的风电场无功优化模型。当设置 $c_1 = c_2 = c_3 = 0$ 时,所建立的模型变为以风电场网损最小为目标的优化模型,此时,风电场将按实际需要同时调用风机、SVG 和 ES 无功。

4 案例分析

为了验证所提方法的有效性,本文对某实际风电场进行仿真实验,如图 2 所示。

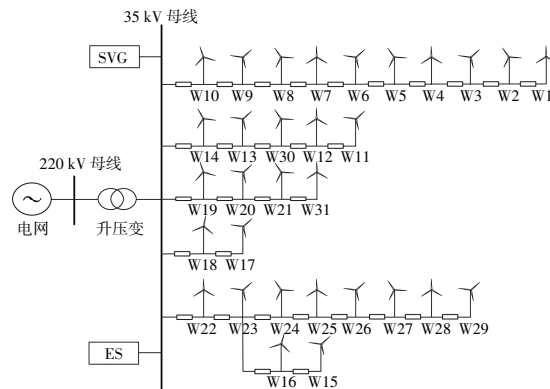


图 2 风电场拓扑图

Fig.2 Topology of a wind farm

该风电场共有 31 台金风科技的直驱风电机组,其参数如表 1 所示。

表 1 风电机组参数
Table 1 Wind turbine parameters

| 风机厂家 | 额定功率 | 发电机类型 | 发电机电压 | 变流器类型 | 变流器功率因素 | 变流器输出电压 |
|----------|---------|----------|--------|--------|-----------------------|--------------|
| 金风科技 | 4.8 MW | 永磁同步发电机 | 740 V | 全功率变流器 | (容性 0.9-感性 0.9) | 690 V |
| 设计风区等级 | 切入风速 | 额定风速 | 切出风速 | 叶轮直径 | 扫风面积 | 轮毂高度 |
| IEC II B | 2.5 m/s | 11.2 m/s | 26 m/s | 136 m | 14 526 m ² | 86/100/110 m |

每台风机经风机变压器汇集至 35 kV 集电线路,集电线路再经升压变压器接入 220 kV 电网,变压器变比均为 1.025。在 35 kV 母线上装设有 $Q_{s,max} = 40$ MVar 静止无功发生器以及 30 MW 的储能装置,假设储能装置在某时刻所能提供的无功容量 $Q_{e,max} = 20$ MVar。

各风机功率预测误差服从均值为 0、标准差为 0.2 MW 的正态分布,电压安全裕度的置信度

$\beta = 0.95$, 上级调度下发给风电场的无功指令 $Q_{com} = -10$ MVar。为便于分析,设各台风机的预测功率相同,均为 $P_i = 0.25k$ MW,则风电场总的风电消纳功率为 $P_w = 7.75k$ MW,其中 $k = 0, 1, 2, \dots, 19$,分别测试风电场在不同消纳功率下的优化结果。

在 A 运行方式 ($c_1 = 0.01, c_2 = 0.03, c_3 = 0.06$) 下,利用本文所提计及无功资源调配成本的风电场优化技术进行优化后,风电场的无功曲线如图 3

所示。

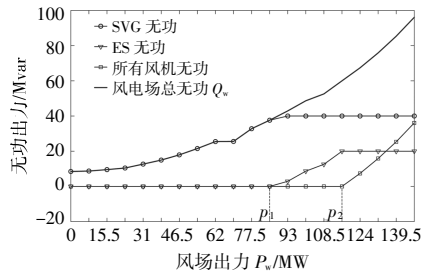


图3 A运行方式下风电场无功曲线

Fig.3 Reactive power curves of wind farm in A operating mode

由图3可知,随着风电场消纳功率的增加,风电场发出的总无功功率不断增加。当风场出力 $P_w \leq p_1$ 时,只有 SVG 发出无功,ES 和风机几乎不发出无功;当 $p_1 < P_w \leq p_2$ 时,SVG 满发无功,ES 开始发出无功,而风机几乎不发无功;当风场出力 $P_w > p_2$ 时,SVG 和 ES 满发无功,风机开始发出无功。

在 B 运行方式 ($c_1=0.03, c_2=0.06, c_3=0.01$) 下,利用本文所提方法进行优化后,风电场的无功曲线如图4所示。

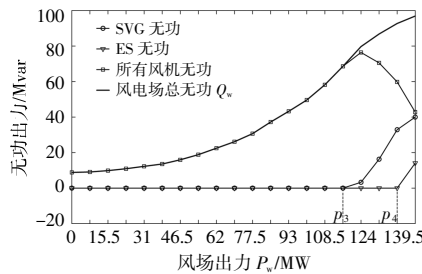


图4 B运行方式下风电场无功曲线

Fig.4 Reactive power curves of wind farm in B operating mode

由图4可知,随着风电场消纳功率的增加,风电场发出的总无功功率也不断增加。当风场出力 $P_w \leq p_3$ 时,只有风机发出无功,SVG 和 ES 几乎不发出无功;当 $p_3 < P_w \leq p_4$ 时,由于风场出力较大,风机所剩的无功容量较小,难以满足风电场需求,SVG 开始发出无功,而 ES 几乎不发出无功;当风场出力 $P_w > p_4$ 时,风机和 SVG 的无功难以满足风电场需求,ES 开始发出无功。

在运行方式 C ($c_1=0.02, c_2=0.02, c_3=0.025$) 和运行方式 D ($c_1=0.025, c_2=0.025, c_3=0.02$) 下,利用本文所提方法对风电场进行优化,所得无功曲线分别如图5,6所示。

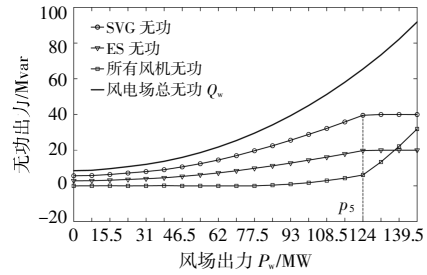


图5 C运行方式下风电场无功曲线

Fig.5 Reactive power curves of wind farm in C operating mode

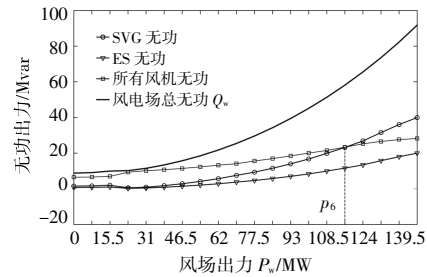


图6 D运行方式下风电场无功曲线

Fig.6 Reactive power curves of wind farm in D operating mode

由图5,6可知,随着风电场消纳功率的增加,风电场将同时调用 SVG,ES 和风机的无功资源。在 C 运行方式下,由于风机的无功成本系数略大于 SVG 和 ES 的无功成本系数,在风场无功充足时 ($P_w \leq p_5$),风电场调配 SVG,ES 的无功多于风机的无功。在 D 运行方式下,由于风机的无功成本系数略小于 SVG 和 ES 的无功成本系数,在风场无功充足时 ($P_w \leq p_6$),风电场调配风机的无功多于 SVG,ES 的无功。因此,风电场调用不同无功资源数量与其无功成本系数存在一定相关性,在风电场无功充足时,无功成本系数低的无功资源被调用的数量多于无功成本系数高的无功资源。

采用网损最小为目标的优化方法 ($c_1=c_2=c_3=0$),所得风电场的无功曲线如图7所示。

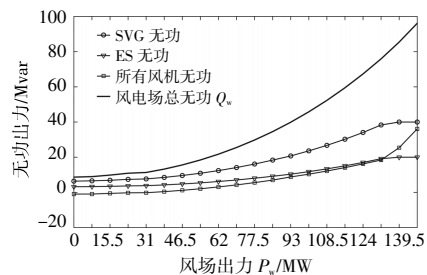


图7 网损最小优化的风电场无功曲线

Fig.7 Reactive power curves of wind farm with minimization of power loss

此时,在任意风场出力下,风电场将同时调配 SVG,ES 和风机的无功。通过图 3~7 分析可知,本文所提计及无功资源调配成本的风电场优化方法,通过合理设置成本系数,能够根据不同运行需求有序调配风电场无功。

图 8 为 A 运行方式下不同风电场出力场景时,分别采用以计及无功资源调配成本的综合成本最小为目标的方法和网损最小为目标的方法,优化后所得的各风机的无功曲线。

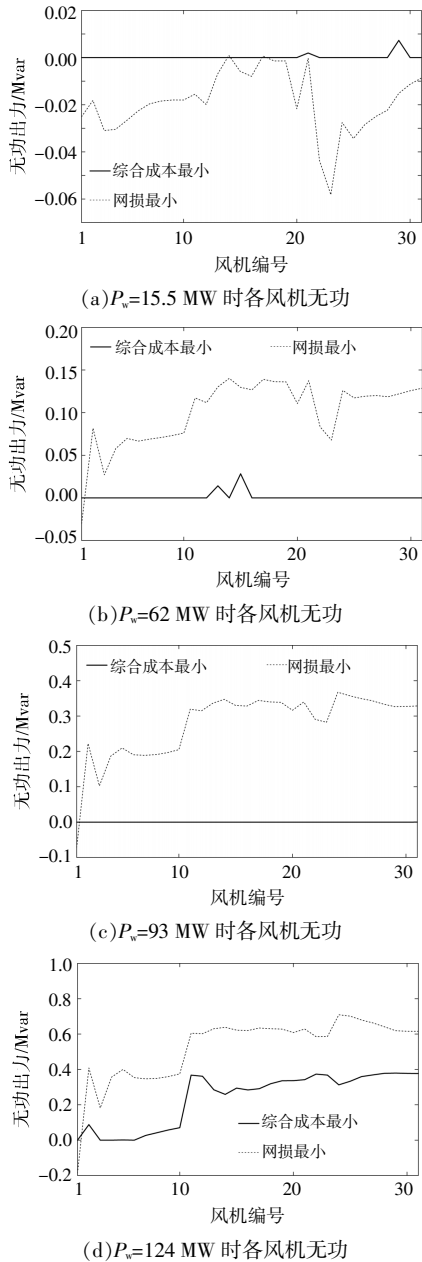


图 8 A 运行方式下各风机无功曲线

Fig.8 Reactive power curves of wind generators in A operating mode

由图 8 可知:以网损最小为目标,风场出力较小时($P_w=15.5$ MW),风机吸收无功;而风场出力较大时($P_w=62, 93, 124$ MW),以综合成本最小为目标,只有在 $P_w=124$ MW 时,风机会发出无功,且其所发无功小于网损最小为目标时所发无功。

该风电场系统共含 64 个节点,节点 1 为 35 kV 母线,节点 2 为 220 kV 母线,节点 3~33 为风机变压器低压侧母线,节点 34~64 为风机变压器高压侧母线。两种优化方法的电压分布如图 9 所示。

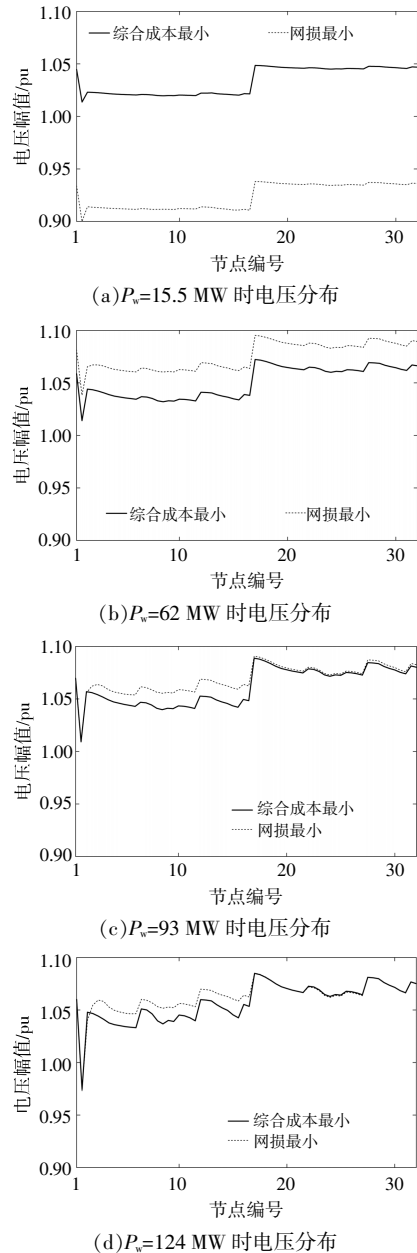


图 9 风电场电压分布曲线

Fig.9 Voltage profiles of wind farm

当风电场出力 $P_w=15.5$ MW 时,两种方法优化后的电压相差较大。随着风场出力的增加,两者

的电压分布逐渐接近。对风电场网损进行统计,结果如表 2 所示。

表 2 不同风场消纳功率的网损
Table 2 Power loss when different wind energy consumption

| 不同风场消纳功率 | $P_w=15.5$ MW ($P_i=0.5$ MW) | $P_w=62$ MW ($P_i=2$ MW) | $P_w=93$ MW ($P_i=3$ MW) | $P_w=124$ MW ($P_i=4$ MW) |
|------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 网损最小为目标(最优网损)/MW | 0.198 | 0.903 | 1.848 | 3.249 |
| 综合成本最小为目标/MW | 0.215 | 0.906 | 1.857 | 3.259 |
| 相差百分比/% | 8.60 | 0.33 | 0.49 | 0.30 |

当风电场出力较小时($P_w=15.5$ MW),两种方法网损相差百分比比较大,约为 8.60%,但此时总网损很小,所以二者网损差的数值可忽略。当风电场出力增加时($P_w=62, 93, 124$ MW),以综合成本最小为目标的方法优化后,系统网损接近于以网损最小为目标方法的优化结果,两者相差小于 0.5%。

近最优网损,且通过预留电压安全裕度能够防止系统电压发生越限。

当风电场出力较大时($P_w=124$ MW),以综合成本最小为目标,未预留电压安全裕度,对风电场进行优化,所得的电压分布曲线如图 10 所示。

参考文献:

- [1] 李彦吉,王鑫陶,康赫然,等.考虑效率、效益与碳减排提升的含可再生能源配电网投资优选模型[J].可再生能源,2021,39(12):1662-1668.
- [2] 姜兆宇,贾庆山,管晓宏.多时空尺度的风力发电预测方法综述[J].自动化学报,2019,45(1):51-71.
- [3] 刘昊,王玮,崔嘉.分散式风电多点接入协调优化控制策略[J].可再生能源,2020,38(2):218-224.
- [4] 王渝红,廖逸霖,宋雨妍,等.风电场内部分散式无功电压优化控制策略 [J]. 高电压技术,2022,48(12):5047-5056.
- [5] 李桂丹,王佳琦,靳新悦,等.风电场内部无功分配优化策略 [J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(7):123-128.
- [6] 李丽霞,姚兴佳,王晓东,等.双馈风电场新型无功优化分配策略研究[J].太阳能学报,2017,38(5):1397-1404.
- [7] 殷桂梁,马会艳,陈学琴.电网电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(4):84-88.
- [8] 刘皓明,唐俏俏,朱凌志,等.双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J].电力系统保护与控制,2014,42(24):79-85.
- [9] 张国彦,姜磊,战文华,等.基于负荷曲线分段的配电网无功优化策略[J].科学技术与工程,2021,21(25):10710-10717.
- [10] 杨蕾,吴琛,黄伟,等.含高比例风光新能源电网的多目标无功优化算法[J].电力建设,2020,41(7):100-109.
- [11] 崔挺,李雪萍,颜畅,等.基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(2):12-20.
- [12] 叶晖,李爱魁,张忠.基于储能的无功补偿技术综述[J].储能科学与技术,2021,10(6):2209-2217.

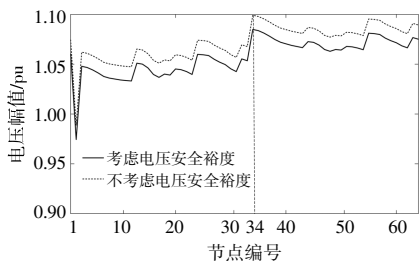


图 10 是否考虑电压安全裕度的风电场电压分布
Fig.10 Voltage profiles of wind farm with or without consideration of voltage safety margin

由图 10 可知,34 节点的电压已经达到上限 1.1 pu,如果风机功率发生波动,将可能导致 34 等节点发生电压越限。图 10 中实线表示预留电压安全裕度优化后的电压分布曲线,风场各节点电压均低于 1.1 pu,当风机功率波动时,更不容易发生电压越限。

5 结论

本文提出一种计及无功资源调配成本的风电场优化技术,实现不同运行需求下的风电场无功优化配置。通过理论推导和案例分析可得到以下结论:①所提方法能够在满足上级无功调度指令要求下,根据不同运行工况需要,通过设置合适的无功成本系数,实现按不同优先顺序调配风电场无功资源;②所提方法能够优化系统网损,使其接

Reactive power optimization technology for wind farms considering the reactive power resources allocation cost

Hu Pan¹, Ding Kai¹, Jiang Kezheng¹, Zhang Zhaoyi², Lai Qiupin², Liu Chengxi²

(1. State Grid Hubei Electric Power Research Institute, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, a reactive power optimization method for wind farms considering the reactive power resources allocation cost is proposed to achieve the optimal reactive power control under different operating conditions. With the comprehensive cost composed of power loss and reactive power cost as the objective function, the reactive power optimization model is established based on chance-constrained programming, considering the influence of wind power fluctuations on voltage magnitude, which is then solved by the improved interior point method. According to the actual operating requirements, the proposed method can schedule reactive power of Static Var Generator (SVG), Energy Storage (ES) and wind generators in sequence by setting reactive power cost coefficients, and optimize the power loss of wind farm. The voltage violation risk is also controlled by reserving the voltage safety margin in the voltage constraint. In the end, the advanced and feasibility of the proposed method is verified by a simulation at an actual wind farm in China.

Keywords: reactive power optimization; power loss; wind power fluctuations; reactive power resources allocation; voltage violation