

# 基于损耗最小化的风电场无功优化策略

刘 军, 赵宣博, 葛 磊, 陈正亮

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

**摘 要:** 当电网调度中心下达无功指令值时,风电场需要将无功指令值合理分配给每台风电机组,从而满足电网稳定运行要求。为实现此目标,提出一种基于损耗最小化的陆上风电场无功优化运行策略,采用改进粒子群优化算法优化每台风电机组的无功功率参考值,以减少风电场的总损耗,包括发电机损耗、变流器损耗、滤波器损耗、变压器损耗和传输线路的损耗。为验证策略的有效性,设置5行5列布局的风电场模型,对常规的无功控制策略与基于损耗最小化的无功优化控制策略在不同场景下进行仿真研究,仿真结果表明该文所提无功优化运行策略能够显著减小风电场的功率损耗。

**关键词:** 风电场; 无功优化控制策略; 损耗最小化; 尾流效应; 永磁同步风电机组

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

## 0 引 言

近年来,随着风电装机规模与渗透率的快速增长,大规模风电并网带来的稳定性问题日益凸显。若风电机组无功支撑不足,将引发电网电压波动,严重时触发脱网事故。因此,开发适用于大型风电场的无功优化控制技术,对维护电网安全稳定运行具有重要意义<sup>[1]</sup>。风电场内各机组间的无功功率调度不仅会影响风电场输出功率,还会影响风电场设备损耗和运营成本。因此,在满足单机无功容量约束的条件下,对风电场的无功控制策略进行优化研究,对于保障电网稳定运行的同时提高风电场发电效益具有重要意义。

无功优化控制策略旨在将电网调度中心需要的总无功功率合理分配至风电场内的各台机组。最简单的是比例控制策略,即根据各台机组的可用无功容量计算其无功参考值<sup>[2]</sup>。这种方法计算量小、易于实现,但由于大规模风电场风速差异较大,各机组运行状况不尽相同,因此比例控制策略不适用于大规模风电场。为满足不同机组的运行要求,人们对基于不同目标函数的无功优化控制策略进行了大量研究,例如降低有功功率损耗<sup>[3]</sup>和保持电压稳定<sup>[4]</sup>。文献[5]结合粒子群优化算法与可行解搜索算法,以风电场有功功率损耗最小作为目标函数,计算各台机组的无功参考值;为提高电压稳定性,文献[6]提出一种基于进化算法的无功控制策略,能够在减小风电场有功功率损耗的同时改善电压分布,从而提高电压稳定性;文献[7]提出一种最大限度减少双馈风电机组风电场损耗的无功控制策略;文献[8]以系统集电线路损耗和并网点电压偏离量的加权最小作为目标函数,采用变

惯性权重粒子群算法对无功进行控制;文献[9]提出一种灵活调用静止无功补偿器、储能设备和机组无功的控制方法,并优化风电场传输线路损耗。此外,通过无功控制策略实现柔性交流输电系统与风电场的协同调度也是一个研究热点。文献[10]提出一种风电场和静止无功补偿设备之间的无功协调调度策略,能够确保电网稳定运行;文献[11]以提高风电场的低电压穿越能力为目标,对风电机组、无功补偿设备及储能装置间的无功控制策略进行研究。

风电机组自身可被视作无功源,无功功率变化会对风电场的潮流分布产生影响,从而影响传输线路的有功功率损耗<sup>[12]</sup>。因此,风电场无功控制策略常以传输线路损耗最小作为目标函数。文献[13]以传输线路损耗最小为优化目标,采用混合粒子群算法求解各台机组的无功参考值;文献[14]中将传输线路损耗和变压器损耗之和最小作为目标函数,采用基于多智能体的粒子群优化算法计算各台机组的无功参考值;文献[15]提出一种适用于海上风电场的无功控制策略,能够减小风电场的传输线路损耗。目前很多研究仅考虑传输线路损耗或传输线路和变压器损耗,忽略了风电机组损耗。但仅以传输线路损耗最小化为目标函数可能会导致风电机组损耗增加,并不能最小化风电场的有功功率损耗。

针对上述问题,本文提出一种以总损耗最小化为目标的风电场无功优化控制策略。采用改进粒子群算法将风电场的无功指令值分配给每台风电机组。为验证所提策略的有效性,设置由25台机组组成的5行5列布局的风电场模型,并考虑机组的尾流效应,将常规的无功功率控制策略与本文提出的无功优化控制策略在不同场景下进行仿真对比研究,

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 陕西省重点研发计划(2021GY-106); 西安市攻关项目(5025)

通信作者: 赵宣博(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事风电场功率优化控制策略方面的研究。xbozhao99@163.com

仿真结果表明本文所提无功优化策略是有效的。

## 1 风电场损耗模型

风电场的总损耗主要包括风电机组的损耗和传输线路损耗。图 1 为风电场组成示意图,包括永磁同步风电机组、变流器、滤波器、变压器和传输线路。由于发电机的损耗与风电场的无功功率无关,因此本文不考虑永磁同步发电机的损耗。

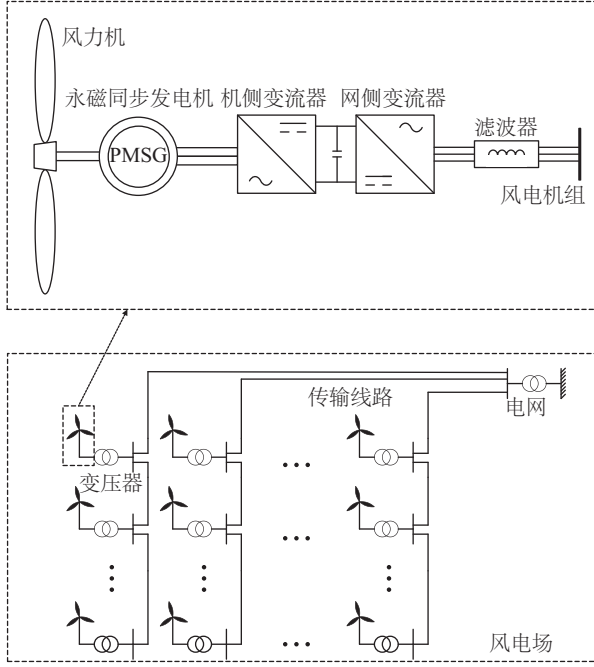


图 1 风电场结构

Fig. 1 Wind farm structure

### 1.1 变流器损耗模型

风电机组的机侧变流器和网侧变流器主要包括绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 和二极管,这些器件的开关和导通会产生功率损耗,可表示为<sup>[16]</sup>:

$$P_{\text{con}}^{\text{loss}} = a_1 i_{\text{rms}} + b_1 i_{\text{rms}}^2 \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{con}}^{\text{loss}}$ ——变流器损耗, W;  $i_{\text{rms}}$ ——机侧或网侧电流的均方根, A;  $a_1$  和  $b_1$ ——功率模块常数,且可由式(2)、式(3)计算:

$$a_1 = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \left( V_{\text{IGBT}} + \frac{E_{\text{on}} + E_{\text{off}}}{I_{\text{C,nom}}} f_{\text{sw}} + \frac{E_{\text{rr}}}{I_{\text{C,nom}}} f_{\text{sw}} \right) \quad (2)$$

$$b_1 = 3r_{\text{IGBT}} \quad (3)$$

式中:  $E_{\text{on}}$  和  $E_{\text{off}}$ ——IGBT 的导通损耗和关断损耗, W;  $E_{\text{rr}}$ ——二极管的反向恢复损耗, W;  $I_{\text{C,nom}}$ ——变流器的额定电流, A;  $f_{\text{sw}}$ ——开关频率, Hz;  $r_{\text{IGBT}}$ ——IGBT 的电阻,  $\Omega$ 。

### 1.2 滤波器损耗模型

滤波器损耗可表示为滤波电阻的损耗<sup>[17]</sup>:

$$P_{\text{filter}}^{\text{loss}} = R_{\text{filter}} (i_{\text{gd}}^2 + i_{\text{gq}}^2) \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{filter}}^{\text{loss}}$ ——滤波器损耗, W;  $R_{\text{filter}}$ ——滤波器的电阻,  $\Omega$ ;  $i_{\text{gd}}$ 、 $i_{\text{gq}}$ ——网侧电流的  $d$  轴、 $q$  轴分量, A。

### 1.3 变压器损耗模型

变压器损耗模型可表示为<sup>[7]</sup>:

$$P_{\text{trans}}^{\text{loss}} = P_0 + \beta^2 P_k \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{trans}}^{\text{loss}}$ ——变压器损耗, W;  $P_0$ ——空载损耗, W;  $P_k$ ——负载损耗, W;  $\beta$ ——负载比。

### 1.4 传输线路损耗模型

风电场传输线路的等效电路如图 2 所示,传输线路的有功功率损耗和无功功率损耗可分别表示为<sup>[18]</sup>:

$$P_{\text{cable}}^{\text{loss}} = \frac{P^2 + Q^2}{V_1^2} R \quad (6)$$

$$Q_{\text{cable}}^{\text{loss}} = \frac{P^2 + Q^2}{V_1^2} X \quad (7)$$

式中:  $P_{\text{cable}}^{\text{loss}}$ 、 $Q_{\text{cable}}^{\text{loss}}$ ——传输线路的有功功率损耗(W)和无功功率损耗(var);  $R$ 、 $X$ ——线路的等效电阻和电抗,  $\Omega$ ;  $P$ 、 $Q$ ——有功功率(W)和无功功率(var);  $V_1$ ——支路节点的电压幅值, V。

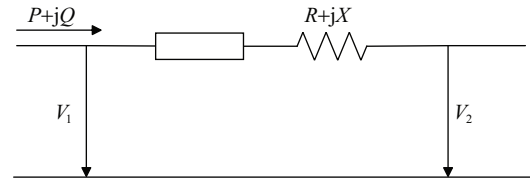


图 2 风电场传输线路的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of transmission line in wind farm

## 2 无功优化运行策略

### 2.1 策略 A: 比例控制策略

比例控制策略根据每台风电机组可用无功功率将电网调度中心的无功指令值分配给每台风电机组,如式(8)所示。

$$Q_{\text{WT},k}^{\text{ref}} = \frac{Q_{\text{WT},k}^{\text{avail}}}{\sum_{k=1}^n Q_{\text{WT},k}^{\text{avail}}} Q_{\text{WF}}^{\text{ref}} \quad (8)$$

式中:  $Q_{\text{WT},k}^{\text{ref}}$ ——分配给第  $k$  台风电机组的无功参考值, var;  $Q_{\text{WF}}^{\text{ref}}$ ——电网调度中心无功指令值, var;  $n$ ——风电场内风电机组的数量, 台;  $Q_{\text{WT},k}^{\text{avail}}$ ——第  $k$  台风电机组当前可用无功功率, 计算公式为:

$$Q_{\text{WT},k}^{\text{avail}} = \sqrt{S_{\text{WT},k}^2 - P_{\text{WT},k}^2} \quad (9)$$

式中:  $S_{\text{WT},k}$ ——第  $k$  台风电机组的容量, VA;  $P_{\text{WT},k}$ ——第  $k$  台风电机组的输出有功功率, W。

## 2.2 策略 B: 以风电场总损耗最小的无功优化控制策略

该策略使用优化算法,旨在最小化风电场的总损耗。每台风电机组的损耗,可表示为:

$$P_{WT}^{\text{loss}} = P_{GSC}^{\text{loss}} + P_{\text{filter}}^{\text{loss}} \quad (10)$$

式中:  $P_{WT}^{\text{loss}}$ ——风电机组损耗, W;  $P_{GSC}^{\text{loss}}$ ——网侧变流器损耗, W;  $P_{\text{filter}}^{\text{loss}}$ ——滤波器损耗, W。

目标函数不仅包含风电场的传输线路的损耗,还包含每台风电机组的损耗,可表示为:

$$\min_{Q_{WT,k}} \left\{ \sum_{k=1}^n (P_{WT,k}^{\text{loss}} + P_{\text{trans},k}^{\text{loss}}) + \sum_{l=1}^m P_{\text{cable},l}^{\text{loss}} \right\} \quad (11)$$

式中:  $P_{WT,k}^{\text{loss}}$ ——第  $k$  台风电机组的损耗, W;  $P_{\text{trans},k}^{\text{loss}}$ ——第  $k$  台风电机组的变压器损耗, W;  $P_{\text{cable},l}^{\text{loss}}$ ——第  $l$  条传输线路损耗, W。

约束条件如下:

1) 母线电压约束

$$U_j^{\min} \leq U_j \leq U_j^{\max} \quad (12)$$

式中:  $U_j^{\min}$  和  $U_j^{\max}$ ——母线  $j$  的电压上下限, V;  $U_j$ ——母线  $j$  的电压值, V。

2) 无功指令值约束

$$|Q_{WF}^{\text{ref}} - Q_{PCC}| \leq \varepsilon \quad (13)$$

$$Q_{PCC} = \sum_{k=1}^n Q_{WT,k}^{\text{ref}} - Q_{\text{cable}}^{\text{loss}} \quad (14)$$

式中:  $Q_{WF}^{\text{ref}}$ ——电网调度中心无功指令值, var;  $Q_{PCC}$ ——并网点处无功功率, var;  $\varepsilon$ ——设定的较小的常数,通常取风电场无功指令的 0.1%。

3) 风电机组约束

$$I_{GSC,k}^{\text{rms}} \leq I_{GSC}^{\text{rated}} \quad (15)$$

$$|Q_{WT,k}^{\text{ref}}| \leq \sqrt{S_{WT,k}^2 - P_{WT,k}^2} \quad (16)$$

式中:  $I_{GSC,k}^{\text{rms}}$ ——第  $k$  台风电机组中网侧变流器的电流有效值, A;  $I_{GSC}^{\text{rated}}$ ——网侧变流器的额定电流, A。

## 2.3 优化方法

粒子群算法具有较强的全局搜索能力,可用于解决无功优化控制这类非线性优化问题。图 3 为以风电场总损耗最小为目标的无功优化控制策略流程,主要包括粒子群算法主函数和适应度函数两个部分,具体步骤如下。

### 2.3.1 初始化

在初始化阶段,需输入风电场结构规模与电气参数,并基于可用无功范围随机生成各台机组的无功参考值,作为粒子位置初始值,同时随机生成粒子速度。

### 2.3.2 计算适应度函数

将粒子位置送入适应度函数,进行是否满足约束条件判断,若满足,则目标函数计算结果即被确定为该粒子的适应度值;若不满足,则令目标函数值为极大值。最后,将目标函

数至返回到粒子群算法主函数。

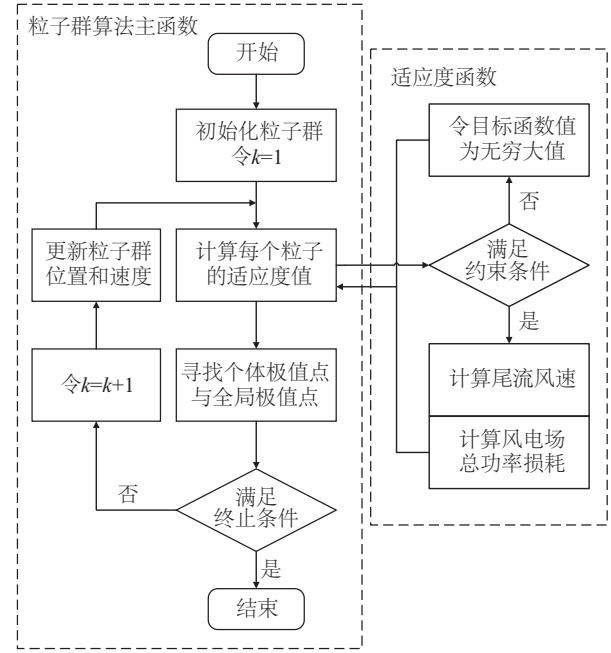


图3 粒子群算法流程

Fig. 3 Particle swarm optimization algorithm flowchart

### 2.3.3 更新粒子

返回到主函数后,继续粒子群算法的判断和迭代过程,对最新个体最优值和群体最优值进行比较,判断是否达到最大迭代次数或满足收敛条件。若满足,则输出优化结果。若不满足,则采用线性递减策略更新惯性权重:

$$w = w_{\max} - \frac{t \cdot (w_{\max} - w_{\min})}{t_{\max}} \quad (17)$$

式中:  $w$ ——惯性权重;  $t$ ——迭代次数;  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$ ——最大和最小惯性权重;  $t_{\max}$ ——最大迭代次数。

采用收缩学习因子策略更新学习因子:

$$C = c_1 + c_2 \quad (18)$$

$$\phi = \frac{2}{\left| \left( 2 - C - \sqrt{C^2 - 4C} \right) \right|} \quad (19)$$

式中:  $c_1$  和  $c_2$ ——学习因子。

根据式(20)和式(21)更新粒子的速度和位置:

$$v_i(t+1) = \phi \left\{ w v_i(t) + c_1 r_1 [p_i - x_i(t)] + c_2 r_2 [p_g - x_i(t)] \right\} \quad (20)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (21)$$

式中:  $x_i(t)$  和  $v_i(t)$ ——第  $i$  个粒子在第  $t$  次迭代时的位置和速度;  $p_i$  和  $p_g$ ——个体最优位置和全局最优位置;  $r_1$  和  $r_2$ ——为 [0,1] 之间的随机数。

## 3 案例研究

图 4 为本文建立的风电场示意图,包含 25 台 2 MW 风电机组,呈 5 行 5 列均匀分布,机组间距为 560 m。表 1 为风电

场输电线路电缆的相关参数,根据不同的负载能力,设置第1~3行机组间、第3~5行机组间和第5行至电网变压器间的传输电缆的截面积分别为95、240和500 mm<sup>2</sup>。

本文研究风电机组最大风能跟踪控制时风电场无功功率的控制问题,并考虑到风电场尾流效应的影响,采用 Jensen 尾流模型计算下游风电机组的风速<sup>[19]</sup>。

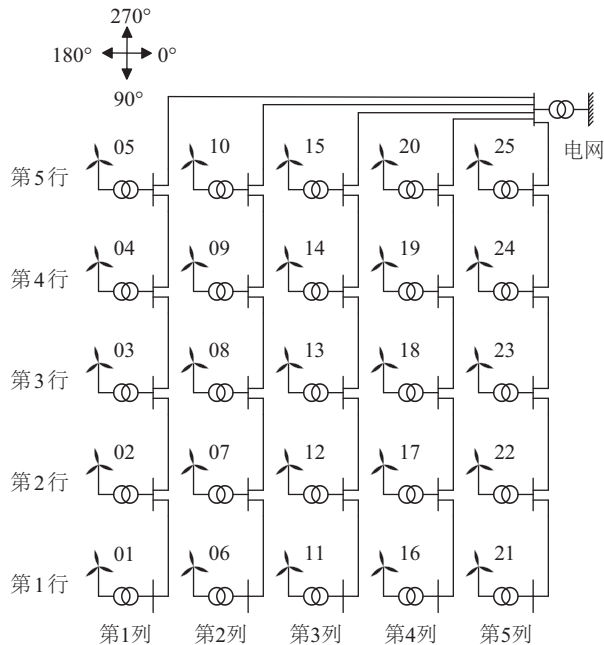


图4 风电场布局<sup>[20]</sup>

Fig. 4 Layout of wind farm<sup>[20]</sup>

表1 电缆参数<sup>[15]</sup>

Table 1 Parameters of cable<sup>[15]</sup>

| 截面积/mm <sup>2</sup> | 电阻/(Ω/km) | 电感/(mH/km) |
|---------------------|-----------|------------|
| 95                  | 0.184     | 0.39       |
| 240                 | 0.073     | 0.33       |
| 500                 | 0.035     | 0.30       |

### 3.1 场景1

设置风速为12 m/s,风向为0°,电网调度中心的无功指令值为5 Mvar。

图5为不同策略下风电场的有功功率分布,由于风电场中机组有功功率控制均采用MPPT控制策略,所以有功功率分布情况一致。图6为风电场的无功功率分布,可看出,策略B风电机组的无功功率由第1~5行呈递增趋势;由第1~5列也呈递增趋势。越远离网节点风电机组分配到的无功功率越低,以此可减少传输线路上的有功功率损耗。同时,风电机组的有功功率与无功功率也与尾流有关,尾流影响导致下游风电机组的有功功率降低,而有功功率对传输线路损耗的影响比无功功率更大,因此,有功功率越高的机组分配更

低的无功功率,以此使风电场产生的总损耗减小。表2为不同策略风电场总功率和总损耗的仿真结果,两种策略下风电场的总功率是相等的,而策略B产生的损耗比策略A减少0.0023 MW。

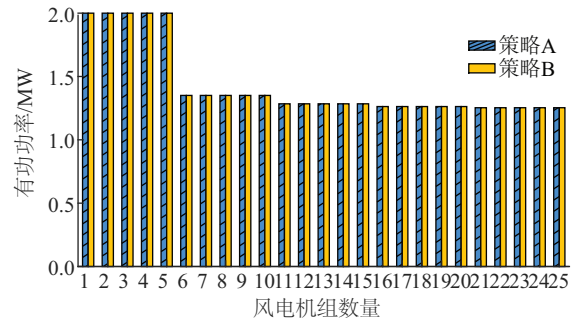


图5 各台风电机组的有功功率

Fig. 5 Active power of each turbine

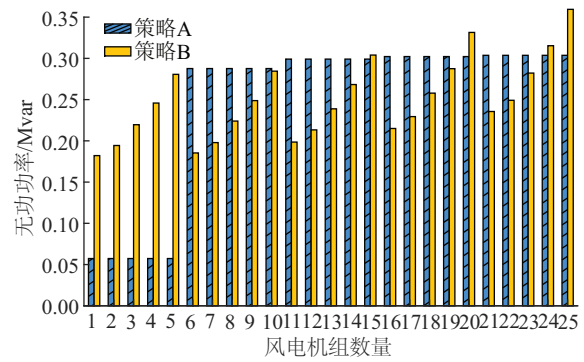


图6 各台风电机组的无功功率

Fig. 6 Reactive power of each turbine

表2 风电场总功率和总损耗的仿真结果

Table 2 Wind farm power and total loss

| 策略  | 风电场总功率/MW | 风电场总损耗/MW |
|-----|-----------|-----------|
| 策略A | 35.762    | 1.0539    |
| 策略B | 35.762    | 1.0516    |
| 差值  | 0.000     | 0.0023    |

### 3.2 场景2

为避免固定场景下仿真结果的偶然性,本节设置不同风速条件、不同风向条件和不同无功指令值条件3种场景,比较和分析不同策略的仿真结果。

#### 3.2.1 不同风速条件

设置风向为0°,风电场的无功指令值为5 Mvar,进行不同风速条件下的仿真。设入流风速变化范围为5~20 m/s,每隔1 m/s进行一次仿真。

图7为不同风速条件下风电场的总功率,A、B两种策略下风电场的总功率基本一致。图8为不同风速条件下风电



场的损耗,两种策略的风电场总损耗曲线几乎完全重合。为观察策略 B 的优化效果,将两种策略风电场总损耗的差值画于图 8 中。由图 8 可看出,在变风速条件下策略 B 的损耗小于策略 A。由图 7 和图 8 还可看出,在 14 m/s 以上风电场的总功率和有功功率损耗都不再变化,这是因为此时风电场内的所有机组都运行在额定功率,即每台风电机组的功率都是 2 MW。

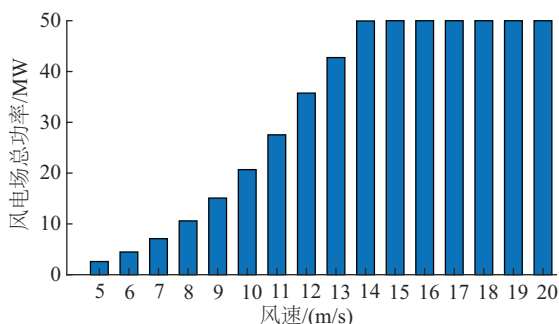


图 7 不同风速下风电场的总功率

Fig. 7 Power of wind farm at different wind speed

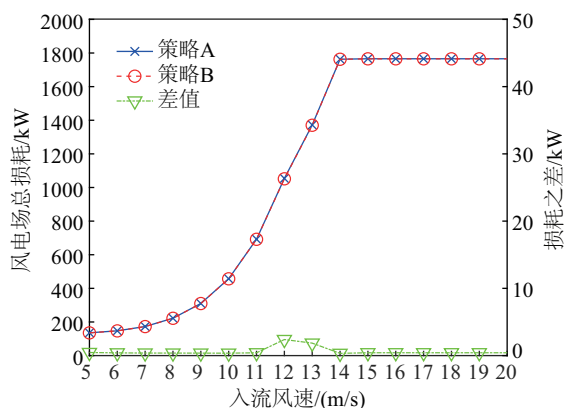


图 8 不同风速下风电场的功率损耗

Fig. 8 Active power loss at different wind velocity

### 3.2.2 不同风向条件

设置风速为 12 m/s,电网调度中心的无功指令值为 5 MVar,在不同风向条件下进行两种策略的仿真实验,设置风向由  $0^\circ \sim 350^\circ$  逐渐增大,每变化  $10^\circ$  进行一次仿真。

图 9 为不同风向条件下风电场的总功率,在风电场正北、正西、正南、正东 4 个方向上的尾流影响严重,在这 4 个方向上风电场的有功功率急剧下降。图 10 为不同风向条件下的风电场的损耗,可看出风电场的总损耗在正北、正西、正南、正东 4 个方向上不同,这是因为并网点的位置会影响传输线路损耗。风向为正北时损耗最小,这是因为距离并网点更近的那一列的风力机产生更大的有功功率,导致传输线路的损耗减小。由图 10 可看出策略 B 在每个风向下风电场的总损耗都相对减小。

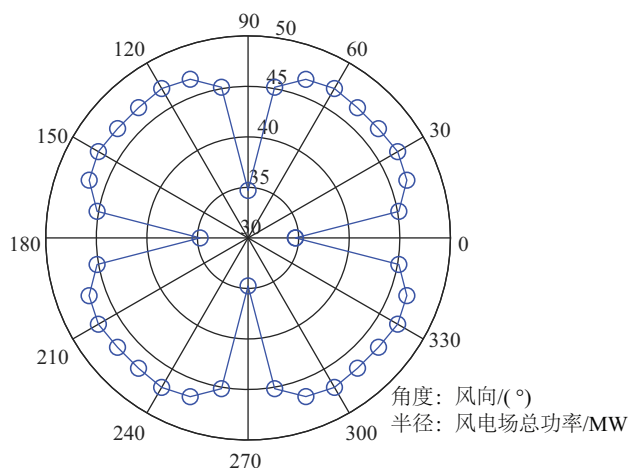


图 9 不同风向下风电场的总功率

Fig. 9 Power of wind farm at different wind directions

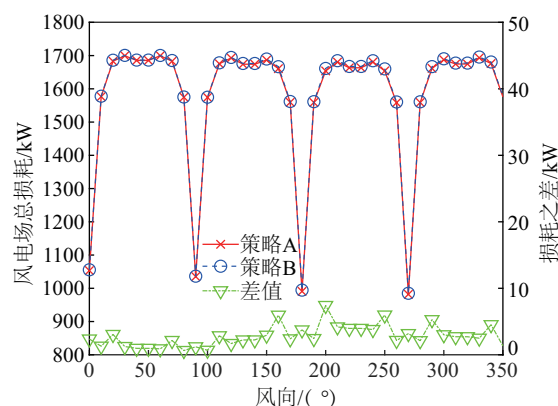


图 10 不同风向下采用不同策略时风电场的总功率损耗

Fig. 10 Active power loss of wind farm at different wind direction

### 3.2.3 不同无功指令值条件

设置风速为 12 m/s,风向为  $0^\circ$ ,观察不同无功指令下两种策略风电场总损耗。设置风电场的无功指令从 0~7.50 Mvar 变化,每隔 1.25 Mvar 进行一次仿真。图 11 为无功功率指令从 0~7.50 Mvar 变化时,两种策略下风电场的总损耗曲

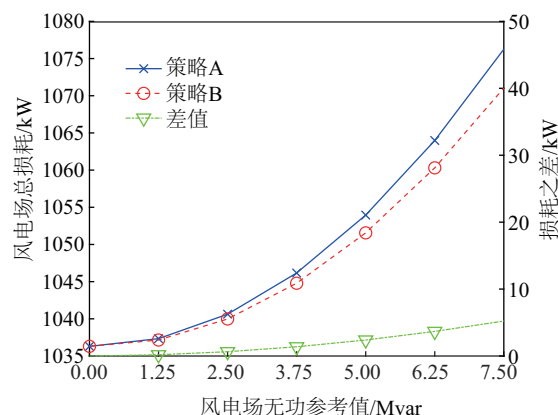


图 11 不同无功指令值下风电场的功率损耗

Fig. 11 Active power loss at different reactive power command

线。由图 11 可看出,随着无功指令的增大,策略 A 和策略 B 风电场总损耗的差值也越来越大,策略 B 优化效果越来越显著。结果表明策略 B 在不同无功功率指令下均可减小风电场总损耗。

### 3.3 场景 3

考虑不规则风电场情况,为分析方便,假设原风电场中 02 号、09 号、15 号、16 号、19 号、21 号和 22 号机组位置有障碍物,未安装风电机组。设置风速为 12 m/s,风向为  $0^\circ$ ,电网调度中心的无功指令值为 5 Mvar,在不规则风电场中进行两种策略的仿真实验,图 12 和图 13 为风电场的有功功率和无功功率分布情况,表 3 为两种策略下风电场总功率及总损耗。

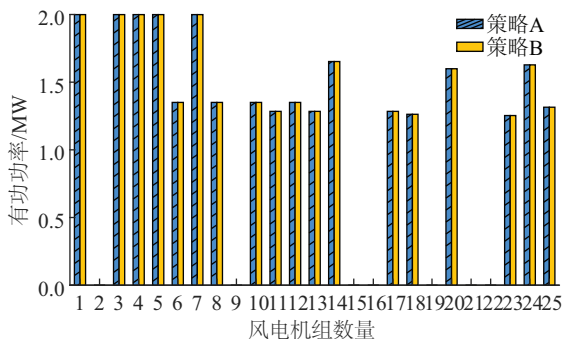


图 12 各台风电机组的有功功率

Fig. 12 Active power of each turbine

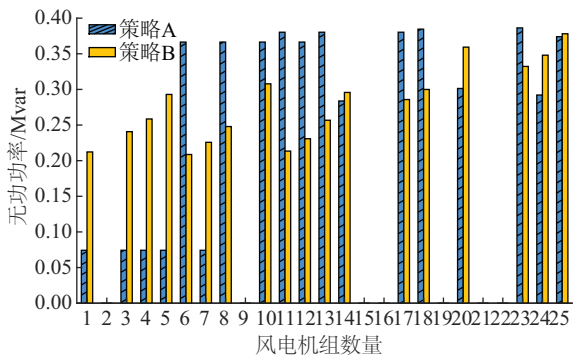


图 13 各台风电机组的无功功率

Fig. 13 Reactive power of each turbine

表 3 场景 3 中的仿真结果

Table 3 Simulation results in scene 3

| 策略   | 风电场总功率/MW | 风电场总损耗/MW |
|------|-----------|-----------|
| 策略 A | 27.961    | 0.8350    |
| 策略 B | 27.961    | 0.8309    |
| 差值   | 0.000     | 0.0041    |

由图 12 可见,由于不规则风电场中机组的上下游关系发生了变化,各台机组的有功功率也发生变化。如图 13 所示,无功功率分布情况与场景 1 中分析一致。如表 3 所示,两种策略下风电场的总功率是相等的,而策略 B 产生的损耗

比策略 A 减少 0.0041 MW。

### 3.4 场景 4

基于前文仿真数据分析表明,风电场的损耗与风速、风向及无功指令值相关联,因此,本小节对策略 A 和策略 B 在一年内风电场总电能损耗情况进行仿真对比。图 14 为风电场风玫瑰图,国家风能技术中心提供原始数据支撑,风速风向监测以 3 h 间隔持续采集,全年生成 2920 个样本数据。图 15 为风电场无功指令值及频数,假设全年的风电场无功指令值服从  $-7.5 \sim 7.5$  Mvar 间的正态分布,每隔 3 h 进行一次采样,累计生成 2920 个样本数据。

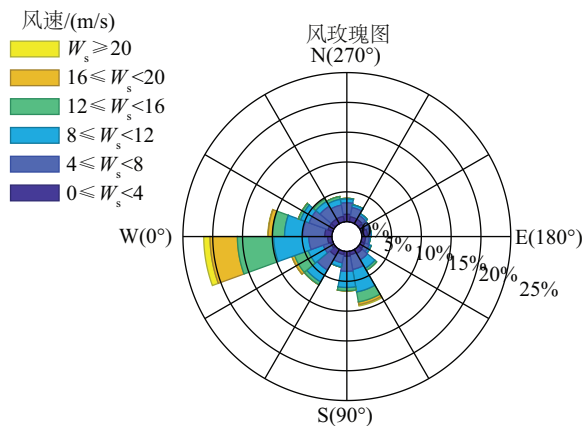


图 14 风玫瑰图

Fig. 14 Wind rose of a year

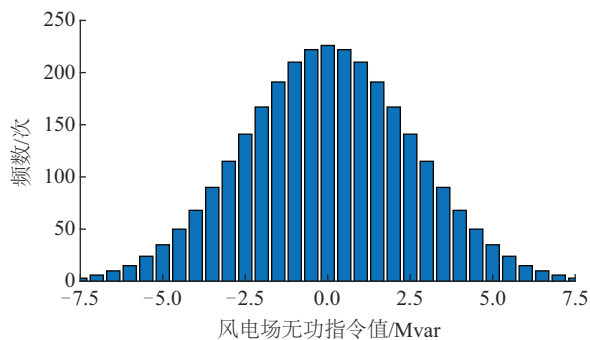


图 15 一年风电场无功功率指令值分布

Fig. 15 One year command value of wind farm reactive power

表 4 为策略 A 和策略 B 风电场的总电能损耗。策略 A 风电场总电能损耗为 2510.1 MW·h,策略 B 风电场总电能损耗为 2508.7 MW·h,相比策略 A 降低 1.4 MW·h。

表 4 策略 A 和策略 B 下一年的总电能损耗

Table 4 Total electric energy power loss of a year with A and B strategies

| 策略   | 风电场总电能损耗/(MW·h) |
|------|-----------------|
| 策略 A | 2510.1          |
| 策略 B | 2508.7          |
| 差值   | 1.4             |

## 4 结 论

本文提出一种考虑尾流效应风电场损耗最小化的风电场无功优化控制策略。采用这种方法将电网的无功功率指令分配给风电场各台风电机组,减小了风电场的功率损耗,提高了风电场的发电效益。与现有文献相比,本文考虑了输电线路的损耗、风电机组的损耗以及尾流效应的影响,通过建立由 5 行 5 列共 25 台 2 MW 风电机组组成的风电场,在不同风速、不同风向和不同无功指令的条件下进行仿真对比分析,仿真结果验证了本文所提出的风电场无功优化控制策略的有效性。

### [参考文献]

- [1] GB/T 19963—2011, 风电场接入电力系统技术规定[S]. GB/T 19963—2011, Technical rule for connecting wind farm to power system[S].
- [2] TAPIA G, TAPIA A, OSTOLAZA J X. Proportional - integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2007, 22 (2) : 488-498.
- [3] MOHSENI-BONAB S M, RABIEE A. Optimal reactive power dispatch: a review, and a new stochastic voltage stability constrained multi-objective model at the presence of uncertain wind power generation [J]. IET generation, transmission & distribution, 2017, 11(4): 815-829.
- [4] RAMIREZ J M, GONZALEZ J M, RUBEN T O. An investigation about the impact of the optimal reactive power dispatch solved by DE [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2011, 33 (2) : 236-244.
- [5] MARTINEZ-ROJAS M, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Reactive power dispatch in wind farms using particle swarm optimization technique and feasible solutions search [J]. Applied energy, 2011, 88 (12): 4678-4686.
- [6] ABOU EL ELA A A, ABIDO M A, SPEA S R. Differential evolution algorithm for optimal reactive power dispatch[J]. Electric power systems research, 2011, 81(2): 458-464.
- [7] ZHANG B H, HU W H, HOU P, et al. Reactive power dispatch for loss minimization of a doubly fed induction generator based wind farm [C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Hangzhou, China, 2015: 1373-1378.
- [8] 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 D D, YU J Y, GE J, et al. Adaptive multi-objective reactive power optimization control strategy for offshore wind farms [J]. Jiangsu electrical engineering, 2024, 43(3): 121-129.
- [9] 胡畔, 丁凯, 江克证, 等. 计及无功资源调配成本的风电场优化技术[J]. 可再生能源, 2024, 42(4): 522-529.
- HU P, DING K, JIANG K Z, et al. Reactive power optimization technology for wind farms considering the reactive power resources allocation cost [J]. Renewable energy resources, 2024, 42(4): 522-529.
- [10] AMARIS H, ALONSO M. Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices [J]. Energy conversion and management, 2011, 52(7): 2575-2586.
- [11] HE J, LI Q, MA J, et al. Research on capacity configuration method of concentrated reactive power compensator for wind farm LVRT capability [J]. The journal of engineering, 2017, 2017(13): 2428-2432.
- [12] ZHANG B H, HU W H, HOU P, et al. Review of reactive power dispatch strategies for loss minimization in a DFIG-based wind farm[J]. Energies, 2017, 10(7): 856.
- [13] KANNA B, SINGH S N. Towards reactive power dispatch within a wind farm using hybrid PSO [J]. International journal of electrical power & energy systems, 2015, 69: 232-240.
- [14] ZHAO B, GUO C X, CAO Y J. A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch [J]. IEEE transactions on power systems, 2005, 20(2): 1070-1078.
- [15] 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.
- LI L X, YAO X J, WANG X D, et al. An optimal reactive power dispatch strategy for interior-point method based wind farms [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38 (5): 1397-1404.
- [16] ULLAH N R, BHATTACHARYA K, THIRINGER T. Wind farms as reactive power ancillary service providers: technical and economic issues [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2009, 24(3): 661-672.
- [17] ZHANG B H, HOU P, HU W H, et al. A reactive power dispatch strategy with loss minimization for a DFIG-based wind farm [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2016, 7(3): 914-923.
- [18] 荣飞, 李培瑶, 周诗嘉. 双馈风电场损耗最小化的有功无功协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 520-529.
- RONG F, LI P Y, ZHOU S J. Coordinated optimal control

- with loss minimization for active and reactive power of doubly fed induction generator-based wind farm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 520-529.
- [19] 刘军, 赵航, 刘安东. 基于机组分类的风电场有功功率分配方法研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 396-403.  
LIU J, ZHAO H, LIU A D. Study on active power distribution method of wind farm based on unit classification [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(8): 396-403.
- [20] 刘军, 武培东, 王启超, 等. 基于尾流重定向风电场输出功率与载荷的联合优化[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 607-614.  
LIU J, WU P D, WANG Q C, et al. Joint optimization of wind farm output power and load based on wake redirection [J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(2): 607-614.

## LOSS-MINIMIZATION-BASED REACTIVE POWER OPTIMIZATION STRATEGY FOR WIND FARMS

Liu Jun, Zhao Xuanbo, Ge Lei, Chen Zhengliang

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** When the grid dispatch center issues a reactive power command value, the wind farm needs to rationally allocate this command value to each wind turbine generator (WTG) to meet grid stability requirements. To achieve this objective, this paper proposes a loss-minimization-based reactive power optimization control strategy for onshore wind farms. An improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is employed to optimize the reactive power reference value for each WTG, aiming to reduce total losses within the wind farm. These losses encompass generator losses, power converter losses, filter losses, transformer losses, and transmission line losses. To validate the effectiveness of the proposed strategy, a wind farm model with a 5×5 layout is established. Simulation studies compare the conventional reactive power control strategy with the proposed loss-minimization-based reactive power optimization control strategy under different scenarios. The simulation results demonstrate that the proposed optimization strategy significantly reduces power losses in the wind farm.

**Keywords:** wind farm; reactive power optimization control strategy; loss minimization; wake effect; PMSC