

DOI: 10.7667/PSPC151174

## 考虑拓扑影响的风电场无功优化策略研究

闫鹏强, 王增平, 陈振新

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 双馈风电机组(DFIG)机群的拓扑结构对风电场无功优化有较大影响。分析了 DFIG 的无功出力极限, 将 DFIG 作为风电场连续无功源, 计及风电场有载调压变压器分接头设置对 DFIG 机端电压的影响。以风电场内部有功损耗最小为优化目标建立风电场无功优化模型。最后, 以丹麦 HornsRev1 离岸风电场为例, 采用粒子群优化算法对所建立的无功优化模型进行求解。仿真结果验证了所提优化控制策略的安全性和经济性。

**关键词:** 双馈风力发电机; 无功极限; 无功优化; 粒子群算法; 有载调压变压器

### Reactive power optimization for wind farm considering impact of topology

YAN Pengqiang, WANG Zengping, CHEN Zhenxin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The topology of doubly fed induction generators (DFIGs) has a greater impact on optimal reactive power dispatch (ORPD) problem within wind farm. The reactive power limits of DFIG are analyzed, DFIGs are regarded as continuous reactive power sources participating reactive power compensation within wind farm and the impact of on-load tap changing transformers (OLTCs) tap on DFIG terminal voltage is considered. The optimal reactive power dispatch model within a wind farm is formulated with an objective of minimizing active power loss. Finally, the problem of optimal reactive power dispatch within HornsRev1 wind farm in Denmark is formulated and a particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed to get the optimal solution. The test results demonstrate the security and economy of the proposed method in achieving optimal solution.

**Key words:** doubly fed induction generator (DFIG); reactive power limits; optimal reactive power dispatch (ORPD); particle swarm optimization (PSO); on-load tap changing transformer (OLTC)

## 0 引言

随着风力发电技术的发展, 双馈机组(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)已成为兆瓦级风力发电机组的主流机型<sup>[1-3]</sup>。DFIG 可以实现有功功率和无功功率的解耦控制, 具有动态调节无功出力的能力<sup>[4]</sup>。DFIG 参与风电场内无功优化, 对保证风电场安全经济运行具有重要作用<sup>[5]</sup>。

许多学者对风电场的无功优化进行了深入、广泛的研究。有参考文献建立了 DFIG 的稳态数学模型<sup>[6-7]</sup>, 在此基础上提出了计算无功极限的方法<sup>[8]</sup>, 为 DFIG 参与风电场无功优化奠定了基础。文献[9-12]考虑了 DFIG 无功出力极限, 并从控制电压的角度提出了风电场的无功优化控制策略。

上述研究从不同角度提出的优化方案基本都是将风电场等值为一台容量较大的机组或者几个等效

机群, 无功优化得到机群总的无功出力后再按比例分到每台 DFIG, 由于没有考虑到风电场 DFIG 机群拓扑结构对无功优化的影响, 这种分配方法会使得风电场内部有功损耗增加, 甚至会影响到风电场内部节点的电压质量, 影响风电场运行的经济性和安全性。文献[6]虽然考虑到了风电场内 DFIG 的拓扑结构, 但是在优化过程中没有考虑有载调压变压器(On-Load Tap Changing Transformer, OLTC)分接头的设置。常规电力系统中 OLTC 分接头影响范围有限, 风电场中 OLTC 分接头设置则会影响到整个风电场 DFIG 的机端电压<sup>[12]</sup>, 因此风电场内部无功优化时需要将 OLTC 分接头选为控制变量。

风电场内的无功电压调控装置包括 DFIG、OLTC 和无功补偿设备<sup>[11]</sup>。当风电机组脱网后, 无功补偿设备由于控制不当继续运行, 是诱发事故扩大的原因<sup>[13]</sup>。本文中无功源为 DFIG 机群, 在 DFIG

机群无功出力范围内进行无功优化, 暂不考虑 DFIG 机群和无功补偿设备之间的配合。

与常规电力系统无功优化相比, 风电场内的无功优化具有不同的特点, 风电场内无功优化需要风电场内大量无功电压调控设备的配合动作; 不仅要处理大量的连续控制变量, 还要处理 OLTC 分接头这样的离散变量。本文充分考虑了 DFIG 无功特性, 建立无功优化模型并采用粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)进行求解。

## 1 DFIG 无功功率极限

DFIG 定子直接接入电网, 转子通过一个背靠背换流器接入电网。通过对换流器的控制可以实现有功和无功的解耦控制, 使得 DFIG 具有动态调节无功的能力<sup>[4]</sup>。

DFIG 网侧换流器发出的无功变化会造成 DFIG 有功出力的波动<sup>[14]</sup>, 并且网侧换流器大多数都工作在单位功率因数情况下<sup>[8]</sup>, 因此本文假设网侧换流器不发出无功, DFIG 发出的无功  $Q_T$  等于定子侧发出的无功功率  $Q_s$ :

$$Q_T = Q_s \quad (1)$$

DFIG 运行在最优功率追踪状态:

$$P_T = K_{opt}(1-s)^3 \quad (2)$$

定子电流  $I_s$  和转子电流  $I_r$  对 DFIG 无功极限的影响见方程(3)和方程(4)<sup>[8]</sup>。

$$Q_T = \pm \sqrt{(3U_s I_s)^2 - (P_T / (1-s))^2} \quad (3)$$

$$Q_T = -3(U_s^2 / x_s) \pm \sqrt{(3(x_m / x_s)U_s I_r)^2 - (P_T / (1-s))^2} \quad (4)$$

式中:  $P_T$  为 DFIG 发出的有功功率;  $s$  为转差率;  $K_{opt}$  为最大功率追踪常数;  $U_s$  为定子电压;  $x_s$  为定子电抗;  $x_m$  为励磁电抗。

方程(3)和方程(4)的轨迹见图 1, 图中  $Q_T | I_s$  为

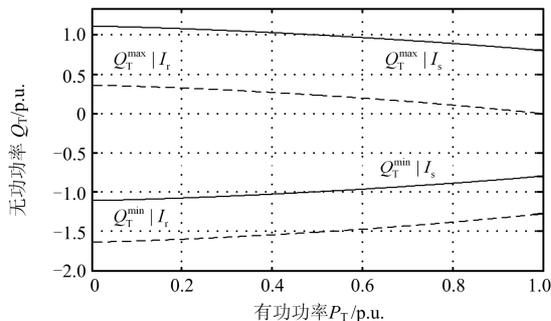


图 1 考虑 DFIG 最大功率追踪后 DFIG 的 P-Q 曲线  
Fig. 1 DFIG reactive-power capability limits considering optimal power-tracking characteristics

$Q_T$  受  $I_s$  限制的轨迹, 用实线表示。  $Q_T | I_r$  为  $Q_T$  受  $I_r$  限制的轨迹, 用虚线表示。  $Q_T^{\max} | I_r$  和  $Q_T^{\min} | I_s$  之间的区域即为考虑 DFIG 最大功率追踪后, DFIG 无功运行的范围。从图中看出, DFIG 吸收无功能力要强于发出无功能力, 并且无功极限随着有功出力增加而减小。画图时所用参数见文献[8]。

## 2 风电场无功优化模型

以降低风电场有功网损为目标, 选取适当的控制变量建立无功优化模型。

### 2.1 控制变量的选择

由于常规能源发电机机端电压变化范围很小, 传统电力系统无功优化计算中发电机节点控制变量的选择一般都是发电机机端电压; 然而对于风电场无功优化来说, 风力发电机组发出的功率变化很大, 如果选发电机机端电压为控制变量, 为了维持风电机组机端电压变化在容许范围内, DFIG 所需发出的无功可能会远远超过 DFIG 的无功极限。因此, 风电场无功优化中的发电机节点控制变量选择为 DFIG 无功出力<sup>[12]</sup>。除此之外, 与常规电力系统无功优化相同的控制变量还有 OLTC 分接头设置和无功补偿设备的容量设置。

### 2.2 目标函数

风电场无功优化的目标为降低内部有功网损。

$$\min f = P_{loss} = \mathbf{e}^T \mathbf{G} \mathbf{e} + \mathbf{f}^T \mathbf{G} \mathbf{f} \quad (5)$$

式中:  $f$  为目标函数;  $P_{loss}$  为有功损耗;  $\mathbf{G}$  为节点电导矩阵;  $\mathbf{e}$ 、 $\mathbf{f}$  为节点电压矩阵的实部和虚部。

### 2.3 约束条件

等式约束为功率约束

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases}, i \in N_{bus} \quad (6)$$

不等式约束包括控制变量  $\mathbf{u}$  和因变量  $\mathbf{x}$  的限制, 控制变量包括各机组发出的无功、无功补偿设备发出的无功和 OLTC 分接头位置; 因变量包括母线电压和线路负载。

线路功率限制

$$S_k^{\min} \leq S_k \leq S_k^{\max}, k \in N_{branch} \quad (7)$$

机组出力不等式约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

无功补偿设备出力约束

$$Q_m^{\min} \leq Q_m \leq Q_m^{\max}, m \in Q \quad (9)$$

有载调压变压器分接头档位限制

$$t_n^{\min} \leq t_n \leq t_n^{\max}, n \in T \quad (10)$$

节点电压限制

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, i \in N_{bus} \quad (11)$$

式中:  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  分别为节点  $i$  上所连风机的有功出力和无功出力;  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  分别为节点  $i$  的有功负荷功率和无功负荷功率;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$ 、 $j$  处电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别为节点  $i$ 、 $j$  间电导、电纳和相角差;  $P_{Gi}^{\max}$ 、 $P_{Gi}^{\min}$  分别为风机有功输出最大值和最小值;  $Q_{Gi}^{\max}$ 、 $Q_{Gi}^{\min}$  分别为风机无功输出最大值和最小值;  $S_k$ 、 $S_k^{\max}$ 、 $S_k^{\min}$  分别为线路流过功率、线路流过功率的上限和下限;  $Q_m$ 、 $Q_m^{\max}$ 、 $Q_m^{\min}$  分别为无功补偿设备输出无功值、上限和下限;  $t_n$ 、 $t_n^{\max}$ 、 $t_n^{\min}$  分别为 OLTC 分接头档位值、档位上限和下限;  $i$ 、 $j$  为节点编号、 $k$  为支路编号、 $m$  为无功补偿设备节点编号、 $n$  为有载调压变压器编号;  $N_{bus}$ 、 $N_{branch}$ 、 $Q$ 、 $T$  分别代表节点集合、支路集合、无功补偿设备接入节点集合、OLTC 接入节点集合。

## 2.4 约束条件的处理

无功优化过程中, 各种约束条件的处理非常重要。控制变量和因变量的处理方法有所不同, 在算法迭代过程中考虑控制变量  $\mathbf{u}$  的不等式约束, 当控制变量越限时, 把越限值限定为边界值; 采用对目标函数叠加罚函数  $F_{penalty}$  的方法<sup>[15]</sup>来处理因变量  $\mathbf{x}$  的不等式约束。罚函数  $F_{penalty}$  为

$$F_{penalty} = k_1 \sum g(u_i) + k_2 \sum g(S_k) \quad (12)$$

$$i \in N_{bus}, k \in N_{branch}$$

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ (x - x_{\max})^2, & x > x_{\max} \\ (x_{\min} - x)^2, & x < x_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

## 3 基于 PSO 算法的 DFIG 风电场无功优化

风电场无功优化为一个多变量、多约束的非线性混合优化问题, 需要同时处理连续变量和离散变量。PSO 算法<sup>[16]</sup>能够同时处理连续和离散变量, 且易于编程实现<sup>[12]</sup>。采用 PSO 算法对风电场进行无功优化。PSO 中, “粒子”用来表示  $N$  维搜索空间中以一定速度  $\mathbf{v}_i$  飞行的一个微粒。使用适应度(目标函数)对粒子进行评价。粒子们通过追随粒子本身的最优粒子  $P_{best}$  和群体最优位置  $G_{best}$  在解空间中进行搜索, 从而获得最优解。粒子根据如下公式来更新自

身速度和在解空间中的位置<sup>[17-18]</sup>。

$$\mathbf{v}_{i,j}^{k+1} = w^k \mathbf{v}_{i,j}^k + c_1 r_1 (P_{best,i,j}^k - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (G_{best,i,j}^k - \mathbf{x}_{i,j}^k) \quad (14)$$

$$\mathbf{x}_{i,j}^{k+1} = \mathbf{x}_{i,j}^k + \mathbf{v}_{i,j}^{k+1}, \forall i \in M, \forall j \in N \quad (15)$$

$$w^k = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (16)$$

式中: 粒子数为  $M$ , 维度为  $N$ ; 第  $i$  个粒子表示为  $\mathbf{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}\}$ ; 速度为  $\mathbf{v}_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN}\}$ ;  $\mathbf{x}_{i,j}^k$ 、 $\mathbf{v}_{i,j}^k$  分别为第  $i$  个粒子  $j$  维第  $k$  次迭代时的位置和速度;  $k$  代表迭代次数;  $w$  为惯性因子;  $c_1$  和  $c_2$  为加速常数;  $r_1$ 、 $r_2$  为  $[0, 1]$  范围里变化的随机数;  $P_{best,i,j}^k$  为第  $i$  个粒子的历史最优时第  $j$  维的值;  $G_{best,i,j}^k$  为群体历史最优时第  $j$  维的值;  $w$  为惯性因子;  $k_{\max}$  为最大迭代次数;  $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$  分别为迭代刚开始时和结束时的惯性因子。

PSO 求解风电场无功优化问题过程如下:

1) 输入风电场参数, 建立风电场数学模型。

2) 计算 DFIG 无功功率调节范围, 通过 PSO 算法计算每台 DFIG 无功出力和 OLTC 分接头设置。PSO 算法计算的具体步骤如下:

① 设定 PSO 相关参数, 初始化粒子群。

② 将粒子值代入潮流计算, 计算每个粒子适应度作为粒子各自的初始最优解。

③ 选出初始群体最优解。

④ 更新惯性因子、粒子速度和位置。更新后, 检查粒子速度和位置是否越限, 如果越限将越限值设定为边界值。

⑤ 重新计算每个粒子适应度。更新粒子历史最优解和群体最优解。

⑥ 检查迭代次数, 如果超过最大迭代次数, 则停止计算, 输出全局历史最优解; 否则返回(4)。

3) 根据群体最优位置得到对应的 DFIG 无功设置、OLTC 分接头设置值和风电场最小损耗。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真风电场介绍

本文以丹麦 HornsRev1 离岸风电场<sup>[12]</sup>为例进行仿真计算。HornsRev1 风电场系统结构如图 2 所示。风电场装机容量为 160 MW, 共有 80 台 Vestas 风电机组, 80 台风电机组排成斜矩形(每行 8 台, 共 10 行), 每台间隔 560 m。集电系统电压等级为 33 kV, 连接到一台 36/150 kV, 160 MVA 升压变压器。升压变压器为 OLTC( $U_N \pm 4 \times 1\%$ ), 即有 9 个分接头可供选择。集电系统线路长度如图 2 所示。风电场接入无穷大电网(85 节点)。集电系统参数如表 1 所示。



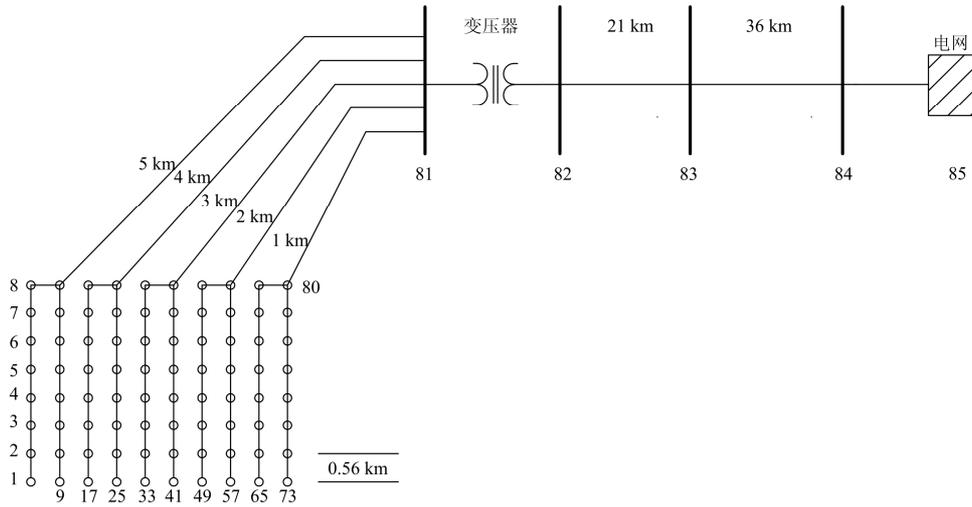


图 2 HornsRev1 风电场结构图

Fig. 2 Layout of grid connected HornsRev1 wind farm

表 1 网络参数

Table 1 Network parameters

元件	$R / (\Omega / \text{km})$	$X / (\Omega / \text{km})$	$C / (\mu\text{F} / \text{km})$	载流能力/kA
机组间电缆	0.16	0.122 52	0.19	0.446
连接到 81 节点的电缆	0.063	0.106 81	0.28	0.726
21 km 电缆	0.036 79	0.000 38	0.19	0.890
36 km 电缆	0.019 63	0.000 35	0.26	0.970
变压器	0.009 378 4 + j0.049 116 7 p.u.			

本文中风电场采用功率因数控制模式<sup>[1]</sup>, 功率因数设定为 0.995。根据并网点有功输出和功率因数得到风电场总的无功输出值, 将无功需求设置为 84 节点的负载, 85 母线节点设置为平衡节点, 其他节点都设置为 PQ 节点。无功优化参数如表 2 所示。

表 2 优化算法参数设置

Table 2 Parameter in optimization algorithm

参数	数值	
约束参数	节点电压最小幅值/p.u.	0.95
	节点电压最大幅值/p.u.	1.05
PSO 参数	粒子数	100
	最大迭代次数	500
	惯性因子	1~0.2 线性递减
设置	加速常数	2.1 和 2.0
	收敛因子	0.729
	粒子速度上下限	0.1~0.001 线性递减

风电场控制变量选择为各风电机组无功功率输出和有载调压变压器分接头设置。

不考虑尾流效应和风电场地形影响, 即认为风

电场内各点风速相等, 每台 DFIG 输出的有功功率相等。首先在某一风速下对 HornsRev1 风电场进行无功优化; 然后在风速波动情况下对风电场进行无功优化。

#### 4.2 某一时刻风电场无功优化

假设某一时刻每台 DFIG 发出 1.5 MW 有功功率, 求得此时 DFIG 无功功率的极限  $Q_{lim}$  为

$$Q_{lim} = [-1.8241 \quad 0.2701] \text{Mvar}$$

把每台 DFIG 无功输出设置为  $Q_{lim}$ , 潮流计算后得到风电场无功输出极限  $Q_{limtotal}$  为

$$Q_{limtotal} = [-166.2424 \quad 17.6246]$$

风电场总的无功需求设为 10 Mvar, 根据 PSO 算法求得各 DFIG 的无功设置和 OLTC 的分接头设置。图 3 为迭代过程中损耗变化图。

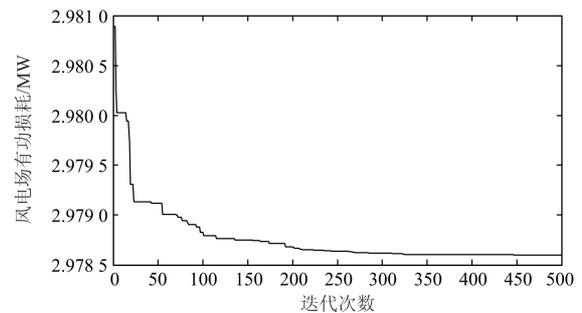


图 3 风电场内有功损耗

Fig. 3 Variation of active power losses

各 DFIG 发出的无功见图 4。可以看到, 对于风电场结构图图 2 中每一列, 靠近 81 节点的 DFIG 机组发出的无功要多于远离 81 节点机组发出的无功; 风电场结构图中左边的列离 81 节点的距离要比

右边的列更远, 左边的列发出的无功更少。无功在长距离线路上流动会造成有功损耗增加, 因此对于机群总无功需求, 主要由靠近风电场并网点的风电机组来补偿。如果不考虑 DFIG 机群拓扑结构, 令各 DFIG 发出的无功相等时(80 台机组每台 0.125

Mvar), 风电场内有功损耗为 3.078 MW; 考虑 DFIG 拓扑分布后优化结果中风电场有功损耗 2.978 6 MW, 有功损耗降低了 3.23%, 说明考虑 DFIG 机群拓扑结构可以进一步提高风电场运行的经济性。

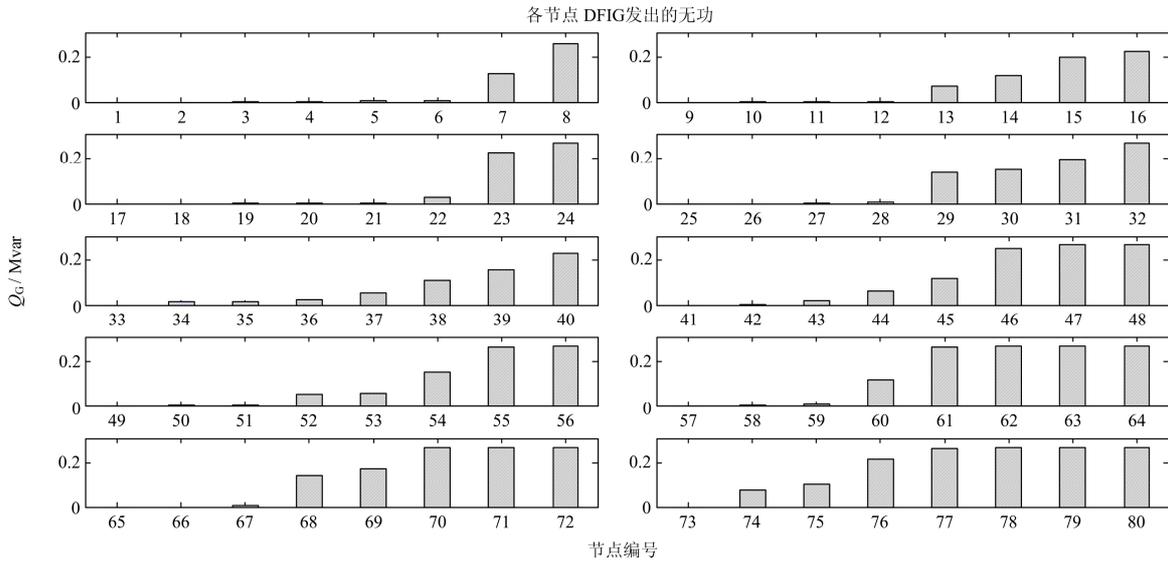


图 4 PSO 优化以后各 DFIG 机组无功出力

Fig. 4 Optimal reactive power setting of all DFIGs obtained using PSO

计算结束后各节点母线电压如图 5 所示, 可以看到远离并网点的风电机组机端电压要高于靠近并网点的机组机端电压, 更容易越限。图 2 中左边的列连接 81 节点的电缆长度要比后面的列长, 相应电缆上电压降落更多, 所以左边的列要比右边的列对应节点电压高一些。本文所提策略避免了长距离线路上的大量无功流动, 确保风电场各节点电压均在规范范围内, 防止 DFIG 因机端电压越限而脱网。

头, 然后保持其他控制变量不变, 再进行一次潮流计算。如果计算结果不满足各项约束条件, 还需重新进行优化计算。对于风电场来说, OLTC 选用离计算结果最近的分接头有可能使远离并网点的 DFIG 机端电压越限, 因此常规优化算法很难处理风电场内部无功优化。由于 PSO 算法能够同时处理连续变量和离散变量, 则不存在这样的问题, 只需要进行一次优化计算就可以找到满意解。PSO 算法求得分接头位置为  $U_N + 1\%$ 。

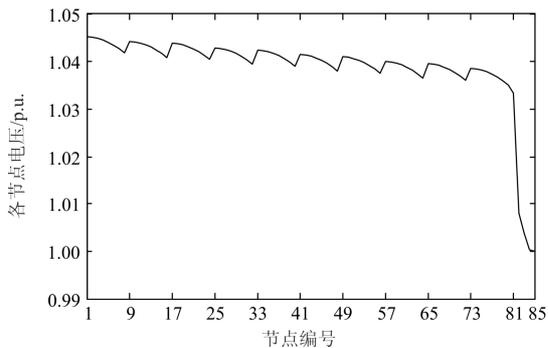


图 5 各节点母线电压

Fig. 5 Bus voltage

常规算法无法同时处理连续变量和离散变量, 因此常规算法求解电力系统无功优化过程中, OLTC 分接头需要折算到离计算结果最近的分接

### 4.3 风速波动时风电场无功优化

风电场实际运行时风速是不断变化的, 对于某一时刻, 已知风电场线路参数, 根据风电场 DFIG 的有功输出, 通过潮流计算可以得到风电场总的有功输出, 本文中风电场采用功率因数控制模式, 由风电场总的有功输出可以得到风电场总的无功输出, 再由本文提出的算法, 将总的无功需求分配到各台 DFIG。

由 DFIG 无功极限和有功出力的关系, 当风电场有功输出增加的时候, 无功极限减小; 由于本文风电场采用功率因数控制模式, 较大的有功输出需要更多的无功输出。因此在得到风电场 DFIG 输出时, 需要计算风电场总的无功极限, 如果风电场无功需求在 DFIG 机群无功极限范围内(DFIG 有功出

力在 0.7 p.u. 范围内), 则无功都由 DFIG 机群提供。当风电场无功需求超出总的 DFIG 机群无功极限时, 需要投入无功补偿设备, 具体无功补偿设备和 DFIG 机群之间的协调, 本文暂不涉及。

图 6 为风电场某天风速。

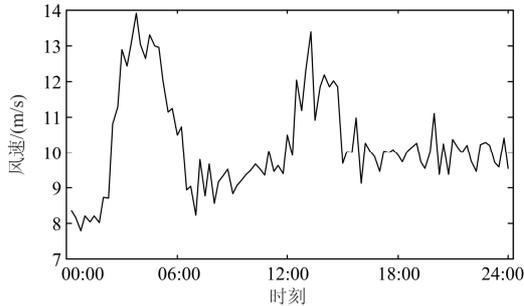


图 6 风速

Fig. 6 Wind speed

根据 DFIG 有功输出和风速的关系, 得到 DFIG 有功输出, 进而得到风电场总的有功输出, 如图 7。

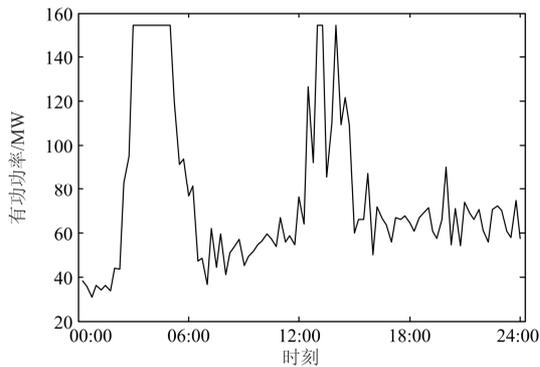


图 7 风电场有功功率

Fig. 7 Active power of wind farm

由 DFIG 有功输出可以得到 DFIG 无功极限, 将风电场每台机组无功输出设置为无功极限值, 潮流计算后可以得到 DFIG 机群在不同风速下的无功极限值, 如图 8 所示。

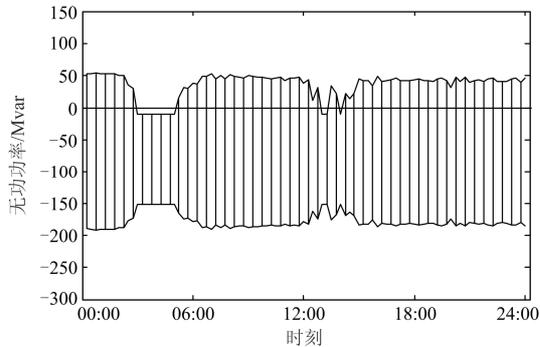


图 8 DFIG 机群总的无功功率极限

Fig. 8 Reactive-power capability limits of all DFIGs

考虑到风速波动较快, 风电场难以根据风速变化实时优化风电机组无功出力。根据风电场参数, 计算风电机组在不同风速和运行状况下的无功输出值, 得到每台风电机组的有功-无功出力曲线。实际运行时, 只需根据每台风机当前的有功输出情况就可以得到相应的无功输出值。图 9 给出了部分风电机组的有功-无功出力曲线。

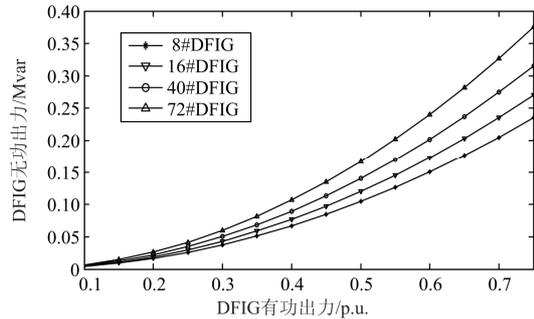


图 9 DFIG 最优有功-无功出力曲线

Fig. 9 Optimal P-Q curve of DFIG

## 5 结论

本文在充分考虑到 DFIG 机群拓扑结构、DFIG 无功调节能力和 OLTC 分接头设置对风电场无功优化的情况下, 以降低风电场有功损耗为目标, 采用 PSO 算法对提出的无功优化模型进行求解。结果表明:

1) 风电场中 DFIG 机群拓扑结构影响风电场内无功优化。风电场内无功优化时考虑 DFIG 机群拓扑结构, 能够在满足风电场各 DFIG 机端电压不越限和电缆载流能力不越限的情况下, 进一步降低风电场有功损耗, 提高风电场运行经济性。

2) 风电场内 OLTC 分接头设置会影响到整个风电场内 DFIG 的机端电压。但是风电场内 OLTC 分接头为离散变量, 传统无功优化算法无法同时处理离散变量和连续变量。采用 PSO 算法求解无功优化模型, 结果表明 PSO 算法同时处理连续变量和离散变量, 确保 DFIG 机端电压质量不越限, 提高风电场运行安全性。

## 参考文献

[1] 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.  
LIU Haoming, TANG Qiaoqiao, ZHU Lingzhi, et al. Hierarchical control strategy of voltage and reactive power for DFIG wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 79-85.

- [2] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.  
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [3] 付文秀, 范春菊. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.  
FU Wenxiu, FAN Chunju. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.
- [4] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.  
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [5] 严干贵, 孙兆键, 穆钢, 等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 140-146.  
YAN Gangui, SUN Zhaojian, MU Gang, et al. Collector system voltage regulation oriented reactive power control strategy for wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 140-146.
- [6] 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.
- [7] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 105-110.  
QIN Tao, LÜ Yuegang, XU Daping. Reactive power control of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 105-110.
- [8] EL-SHIMY M. Modeling and analysis of reactive power in grid-connected onshore and offshore DFIG-based wind farms[J]. Wind Energy, 2014, 17(2): 279-295.
- [9] ZHAO J, LI X, HAO J, et al. Reactive power control of wind farm made up with doubly fed induction generators in distribution system[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(6): 698-706.
- [10] SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, RODRIGUEZ AMENEDO J. Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1837-1840.
- [11] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 双馈风电场无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 1-6.  
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Reactive power and voltage coordinated control strategy of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 1-6.
- [12] KANNA B, SINGH S N. Towards reactive power dispatch within a wind farm using hybrid PSO[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 69: 232-240.
- [13] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 41-44.  
LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbines' trip-off from grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 41-44.
- [14] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2714-2720.  
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [15] ABIDO M. Optimal power flow using particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(7): 563-571.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization[C] // Proceedings of the 1995 Ieee International Conference on Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [17] 王娜, 周有庆, 邵霞. 基于混合神经网络的风电场风资源评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 370-376.  
WANG Na, ZHOU Youqing, SHAO Xia. Wind energy resource assessment of wind farm based on hybrid neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 370-376.
- [18] 苏海滨, 高孟泽, 常海松. 基于粒子群算法的微电网有功无功下垂控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 365-369.  
SU Haibin, GAO Mengze, CHANG Haisong. Microgrid droop control of active and reactive power based on PSO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 365-369.

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2016-01-20

作者简介:

闫鹏强(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为风力发电; E-mail: yan2010@live.com

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化;

陈振新(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电。

(编辑 葛艳娜)