



## 含混合型潮流控制器的风电并网系统潮流优化

袁博 关辰皓 吴熙

### Power Flow Optimization of Wind Power Integrated System With Hybrid Power Flow Controller

YUAN Bo, GUAN Chenhao, WU Xi

引用本文:

袁博, 关辰皓, 吴熙. 含混合型潮流控制器的风电并网系统潮流优化[J]. 现代电力, 2024, 41(3): 470–478. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0297

YUAN Bo, GUAN Chenhao, WU Xi. Power Flow Optimization of Wind Power Integrated System With Hybrid Power Flow Controller[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(3): 470–478. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0297

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0297>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 计及风功率波动的交直流系统区间最优潮流计算及直流潮流控制器的配置

Wind Power Fluctuation Considered Calculation of Interval Optimal Power Flow in AC/DC System and Configuration of DCPFC  
现代电力. 2020, 37(6): 613–621 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1072>

#### 具备潮流控制功能的多端口混合式直流断路器

Multi-port Hybrid DC Circuit Breaker With Power Flow Control  
现代电力. 2020, 37(6): 598–604 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0430>

#### 基于统一潮流控制器和拓扑调整的海上风电功率控制策略

A Power Control Strategy of Offshore Wind Power Based on Unified Power Flow Controller and Topology Adjustment  
现代电力. 2023, 40(3): 285–294 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0326>

#### 多微网最优潮流功率调度及协同优化控制策略

Multi-microgrid Optimal Power Flow Dispatching and Collaborative Optimization Control Strategy  
现代电力. 2021, 38(5): 473–482 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0146>

#### 含多种控制策略的直流电网潮流统一表达与可行解求取

Unified Expression of Power Flow and Feasible Solution for DC Power Network with Multiple Control Strategies  
现代电力. 2019, 36(5): 24–30 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I5/24>

#### 平抑风电波动的混合储能系统自适应控制策略

Adaptive Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Mitigating Wind Power Fluctuations  
现代电力. 2020, 37(6): 646–653 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0949>

# 含混合型潮流控制器的风电并网系统潮流优化

袁博<sup>1</sup>, 关辰皓<sup>2</sup>, 吴熙<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北省 石家庄市 050000;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096)

## Power Flow Optimization of Wind Power Integrated System With Hybrid Power Flow Controller

YUAN Bo<sup>1</sup>, GUAN Chenhao<sup>2</sup>, WU Xi<sup>2</sup>

(1. Economic and Technology Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

**摘要:** 混合型潮流控制器 (hybrid power flow controller, HPFC) 可以有效解决风电并网系统中存在的支路潮流过载问题, 且相较于统一潮流控制器成本更低。针对现有的HPFC潮流优化研究尚未计及支路潮流最大值约束和风电不确定性的问题, 提出一种基于场景削减的含HPFC风电并网系统最优潮流模型。首先, 建立HPFC的功率注入模型, 并推导了注入功率表达式; 其次, 采用K均值算法削减风电、负荷概率场景, 通过 $CH^{+}$ 指标选择最优场景集合; 最后, 建立兼顾发电机运行成本、系统网络损耗、正常运行及 $N-1$ 故障下的支路负载率的多目标优化模型, 采用多目标粒子群优化 (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法进行求解, 利用模糊满意度函数在Pareto解集中筛选出折衷解。在MATLAB中仿真验证所提方法的有效性, 结果表明该方法可以计及风电不确定性, 保证电网在不同场景下的安全经济运行。

**关键词:** 混合型潮流控制器; 风电并网系统;  $N-1$  安全约束; 最优潮流; 多目标粒子群

**Abstract:** Hybrid power flow controller (HPFC) is effective in branch power flow overload of wind power integrated system with lower cost compared with unified power flow controller (UPFC). Since the existing research of HPFC power flow optimization has not considered the branch power flow maximum constraint and wind power uncertainty, a new power flow optimization model based on scene reduction was proposed for wind power integrated system with HPFC. Power injection model of HPFC was established and corresponding injection power was derived. Then, K-means algorithm was used to reduce the probability scenes of wind power and load, and the optimal scene is selected by the  $CH^{+}$  index. Besides, a multi-objective optimization model was established, which considers the generator operation cost, power loss of the system, branch load

rate in normal operation and after  $N-1$  contingencies. Multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm was used to solve the model, and the selection of compromise solution in Pareto solution was realized by the fuzzy satisfaction function. The effectiveness of the proposed method was verified in MATLAB, and the results show that the method can fully consider the uncertainty of wind power and ensure the safe and economic operation of a power grid in different scenes.

**Keywords:** hybrid power flow controller; wind power integrated system;  $N-1$  security constraint; optimal power flow; multi-objective particle swarm optimization

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0297

## 0 引言

为了降低化石能源消耗, 减轻地球环境污染, 许多国家都致力于开发新型可再生能源<sup>[1]</sup>。风电作为一种技术最成熟、最具规模发展的可再生能源, 它在电力系统中的渗透率不断提高<sup>[2-3]</sup>。但是, 由于受到环境因素的制约, 风电场的输出功率存在较大的不确定性。因此, 大规模的风电并网将极大地影响电网的安全性、稳定性<sup>[4]</sup>。

目前, 计及风电不确定性的优化方法有概率优化、机会约束规划和场景优化。概率优化就是用概率分布函数表征随机变量的不确定性, 从而进行优化。文献<sup>[5-6]</sup>分别采用点估计法和准蒙特卡罗模拟法对风电的概率特性进行建模, 但概率优化无法得到确定的优化结果。机会约束规划将随机变量先转化为概率约束, 再转换成确定性约束进行计算。文献<sup>[7]</sup>提出了一种基于分布鲁

棒机会约束多区间最优潮流的可交付灵活调节服务模型；文献 [8] 结合高斯混合模型和线性化潮流方程，求解机会约束规划问题。机会约束规划虽然能得到确定的优化结果，但存在计算过程较为复杂、计算速度慢的缺点。场景优化即通过聚类算法建立随机变量的典型集合。文献 [9-10] 针对风力发电机组负荷和输出功率的不确定性，分别采用模糊 C 均值算法和同步回代法将风电和负荷场景进行削减，确定典型场景集合，提高了计算效率。

统一潮流控制器 (unified power flow controller, UPFC) 作为柔性交流输电系统 (flexible AC transmission system, FACTS) 的代表，可以实现对支路潮流的控制、节点电压的稳定，从而极大地改善了网络的可控性和安全性 [11]。将 UPFC 引入风电并网系统，能有效地解决电网电压不稳定、支路潮流过载等问题 [12]。而混合型潮流控制器 (hybrid power flow controller, HPFC) 在 UPFC 的基础上进行了改良，在相同的调控范围下，其成本比 UPFC 更低 [13]。

在潮流优化方面，文献 [14] 采用非线性内点法计算含广义 UPFC 系统的最优潮流 (optimal power flow, OPF) 问题。文献 [15] 针对 UPFC 的潮流优化问题，以断面负载均衡度作为 UPFC 的评价指标，采用二次规划中的有效集法进行求解；文献 [16] 构建了以静态安全裕度为目标函数的考虑 UPFC 控制模式的优化模型；文献 [17] 利用闪电连接过程优化 (lightning attachment procedure optimization, LAPO) 算法求解 UPFC 模型的 OPF 问题，考虑了包括燃料成本、改善电压分布和提高电压稳定性指标在内的多个目标函数。文献 [18] 把发电机成本和有功损耗作为优化目标，通过遗传算法求解 HPFC 的 OPF。文献 [19] 采用 AMPL (用于优化目的的数学建模工具)，对含 HPFC 的双区域系统的潮流和 OPF 问题进行研究。

现有关于 HPFC 的潮流优化研究在进行优化计算时都没有考虑支路潮流最大值的约束，其计算得到的结果可能并非可行解，在发生  $N-1$  故障时甚至可能会出现潮流过载现象，影响系统正常运行。此外，上述研究主要基于固定场景进行，用于风电并网系统会存在局限性，部分情况下优化结果甚至会出现劣解，给系统造成危害。鉴于此，本文提出一种基于场景削减的含 HPFC 风电

并网系统潮流优化模型。首先，依据叠加原理推导了 HPFC 注入功率的表达式；然后，依据 K 均值算法得到风电、负荷概率场景；最后，通过多目标粒子群优化 (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法求解综合考虑安全性与经济性的多目标潮流优化模型，为含 HPFC 的风电并网系统的潮流优化提供方案参考。

## 1 HPFC 模型和风电场景聚类方法

### 1.1 HPFC 稳态模型

HPFC 的典型结构如图 1 所示 [20]。其主要由 UPFC 和 SEN 变压器 (SEN transformer, ST) 串联组成，其中 ST 承担主要的调节任务，而 UPFC 负责更为精确的调节。通过 UPFC 和 ST 的联合调节，HPFC 可以实现控制潮流、稳定电压等功能。

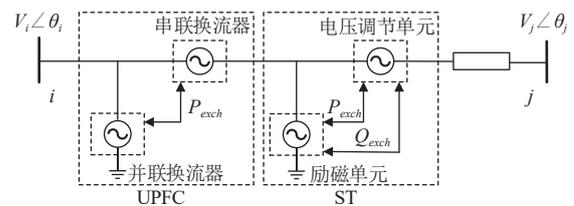


图 1 HPFC 的简化结构

Fig. 1 Simplified structure of HPFC

将 UPFC 的串联换流器和 ST 的电压调节单元等效为电压源，UPFC 的并联换流器和 ST 的励磁单元等效为电流源，可以得到 HPFC 的等效电路，如图 2 所示。

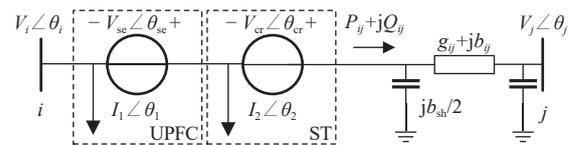


图 2 HPFC 的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of HPFC

图 2 中，系统的受控支路为  $ij$  支路。 $V_i$ 、 $\theta_i$ 、 $V_j$ 、 $\theta_j$  为节点  $i$  和节点  $j$  的电压幅值及相角； $V_{sc}$ 、 $\theta_{sc}$  为 UPFC 的串联侧输出电压幅值及相角； $V_{cr}$ 、 $\theta_{cr}$  为 ST 的串联侧输出电压幅值及相角； $I_1$ 、 $\theta_1$ 、 $I_2$ 、 $\theta_2$  分别为 UPFC 和 ST 的并联侧注入电流幅值及相角； $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  分别为受控支路的有功和无功潮流； $g_{ij}$ 、 $b_{ij}$  为支路串联电导和电纳； $b_{sh}$  为支路并联电纳。

依据功率注入法，将图 2 中的电压源转换成对于节点  $i$ 、 $j$  的附加注入功率，如下所示

$$P_{is} + jQ_{is} = -V_i \angle \theta_i [I_1 \angle \theta_1 + I_2 \angle \theta_2 + (V_{se} \angle \theta_{se} + V_{cr} \angle \theta_{cr}) \cdot j b_{sh}/2 + (V_{se} \angle \theta_{se} + V_{cr} \angle \theta_{cr}) \cdot (g_{ij} + j b_{ij})]^* \quad (1)$$

$$P_{js} + jQ_{js} = V_j \angle \theta_j [(V_{se} \angle \theta_{se} + V_{cr} \angle \theta_{cr}) \cdot j b_{sh}/2 + (V_{se} \angle \theta_{se} + V_{cr} \angle \theta_{cr}) \cdot (g_{ij} + j b_{ij})]^* \quad (2)$$

式中： $P_{is}$ 、 $Q_{is}$ 、 $P_{js}$ 、 $Q_{js}$ 分别为 HPFC 对于节点  $i$  和节点  $j$  的附加注入功率。

结合 UPFC 串并联侧有功平衡和 ST 串并联侧功率平衡，将式 (1)—(2) 进行化简，最终得到

$$P_{is} = -V_{se}^2 g_{ij} - 2V_i V_{se} g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se}) + V_{se} V_j [g_{ij} \cos(\theta_{se} - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_{se} - \theta_j)] - V_{cr}^2 g_{ij} - 2V_i V_{cr} g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{cr}) + V_{cr} V_j [g_{ij} \cos(\theta_{cr} - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_{cr} - \theta_j)] \quad (3)$$

$$Q_{is} = -\text{Im}[V_i \angle \theta_i (I_1 \angle \theta_1)^*] - V_i V_{se} g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_{se}) + V_i V_{se} (b_{ij} + b_{sh}/2) \cos(\theta_i - \theta_{se}) + V_{cr}^2 (b_{ij} + b_{sh}/2) + 2V_i V_{cr} (b_{ij} + b_{sh}/2) \cos(\theta_i - \theta_{cr}) + V_{cr} V_j [b_{ij} \cos(\theta_{cr} - \theta_j) - g_{ij} \sin(\theta_{cr} - \theta_j)] \quad (4)$$

$$P_{js} = V_{se} V_j [g_{ij} \cos(\theta_{se} - \theta_j) - b_{ij} \sin(\theta_{se} - \theta_j)] + V_{cr} V_j [g_{ij} \cos(\theta_{cr} - \theta_j) - b_{ij} \sin(\theta_{cr} - \theta_j)] \quad (5)$$

$$Q_{js} = -V_{se} V_j [b_{ij} \cos(\theta_{se} - \theta_j) + g_{ij} \sin(\theta_{se} - \theta_j)] - V_{cr} V_j [b_{ij} \cos(\theta_{cr} - \theta_j) + g_{ij} \sin(\theta_{cr} - \theta_j)] \quad (6)$$

将式 (3)—(6) 作为相应节点的附加注入功率代入牛顿拉夫逊迭代中的功率平衡方程，即可进行含 HPFC 系统的潮流计算。

## 1.2 K 均值聚类算法

由于风力发电量与负荷存在随机性，而大量的样本数据虽然能充分反映风电和负荷的变化特征，但同时也降低了计算的效率。为了综合考虑场景的有效性和计算效率，本文应用 K 均值算法对风电、负荷数据进行聚类。K 均值算法以迭代法为基础，具有原理简单、运算速度快等优点。

假设样本集合为  $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n\}$ ， $n$  为样本数目，单个样本  $\mathbf{x}_p = \{x_{p1}, x_{p2}, \dots, x_{pm}\}$  ( $p=1, 2, \dots, n$ )， $m$  为样本的维数。样本集合具体可以表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

在为每个聚类选择聚类中心后，用欧式距离表征每个样本与聚类中心的相似程度，其计算公式为

$$d(\mathbf{x}_p, \mathbf{u}_q) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{pk} - u_{qk})^2} \quad (8)$$

式中：聚类中心  $\mathbf{u}_q = \{u_{q1}, u_{q2}, \dots, u_{qm}\}$  ( $q=1, 2, \dots, K$ )； $K$  为聚类中心总数。

当样本划分完成后，计算各聚类中样本的平均值，替换原有的聚类中心，其计算公式为

$$\mathbf{u}_q = \frac{1}{N_q} \sum_{x_k \in A_q} x_k \quad (9)$$

式中： $A_q$  为聚类中心  $\mathbf{u}_q$  所对应的聚类集合； $x_k$  为该集合中的样本； $N_q$  为集合中的样本总数。

最后，采用样本的残差平方和  $E$  作为迭代收敛判据，其计算公式为

$$E = \sum_{q=1}^K \sum_{x_k \in A_q} |\mathbf{u}_q - x_k| \quad (10)$$

本文选用  $CH^{(+)}$  指标判断聚类的有效性<sup>[21]</sup>，从而选择最佳场景集合。 $CH^{(+)}$  指标的定义为

$$CH^{(+)} = \frac{T_K(N-K)}{P_K(K-1)} \quad (11)$$

式中： $T_K$  为类间离差平方和，主要反映类间分离性； $P_K$  为类内离差平方和，主要反映类内紧凑性； $N$  为样本总数。

随着  $K$  值的增大， $P_K$  的值逐渐减小， $T_K$  逐渐增大，最终在某一个  $K$  值下  $CH^{(+)}$  指标达到最大值。 $CH^{(+)}$  指标值越大，说明所取  $K$  值的聚类效果越好。

依据上述分析，采用 K 均值算法划分风电、负荷场景的具体计算步骤如下：

- 1) 获取风电、负荷样本数据，建立样本数据矩阵  $\mathbf{X}$ ；
- 2) 随机选择  $K$  个初始聚类中心；
- 3) 依据式 (8) 的计算结果，将样本与最近的聚类中心归类为一个聚类；
- 4) 依据式 (9) 对聚类中心进行再计算；
- 5) 若式 (10) 收敛则计算结束，否则重复步骤 3) 和 4)；
- 6) 依据式 (11) 计算各  $K$  值对应的  $CH^{(+)}$  指标，选取最佳的聚类结果。

场景  $\zeta$  的出现概率  $\lambda_\zeta$  的计算公式为

$$\lambda_\zeta = \frac{N_\zeta}{N} \quad (12)$$

式中： $N_\zeta$  为场景  $\zeta$  中包含的样本数量。

## 2 含 HPFC 的多目标优化模型

### 2.1 目标函数

针对风力发电系统存在的电力系统潮流超载问题，本文提出了一种同时考虑系统安全性和经济性的多目标优化模型，以发电机运行成本和系统网络损耗为经济指标，以潮流负载指数为安全指标。

#### 1) 发电机运行成本。

发电机运行成本的计算模型如下所示

$$f_1 = \sum_{\alpha=1}^{N_G} (\eta_{1\alpha} P_{G\alpha}^2 + \eta_{2\alpha} P_{G\alpha} + \eta_{3\alpha}) \quad (13)$$

式中： $N_G$ 为系统中的发电机总数目； $\eta_{1\alpha}$ 、 $\eta_{2\alpha}$ 、 $\eta_{3\alpha}$ 为第 $\alpha$ 台发电机的发电费用系数； $P_{G\alpha}$ 为第 $\alpha$ 台发电机输入系统的有功功率。

#### 2) 系统网络损耗。

系统网络损耗主要是潮流经过支路造成的有功损耗，即

$$f_2 = \sum_{l=1}^{N_L} |P_{l1} + P_{l2}| \quad (14)$$

式中： $N_L$ 为系统的支路总数目； $P_{l1}$ 和 $P_{l2}$ 分别为支路 $l$ 上首端流向末端和末端流向首端的有功潮流。

将式(14)化简后可以得到

$$f_2 = \sum_{l=1}^{N_L} G_l [V_{l1}^2 + V_{l2}^2 - 2V_{l1}V_{l2} \cos(\theta_{l1} - \theta_{l2})] \quad (15)$$

式中： $G_l$ 表示支路 $l$ 上的电导； $V_{l1}$ 、 $V_{l2}$ 、 $\theta_{l1}$ 、 $\theta_{l2}$ 分别为支路 $l$ 的首端和末端节点电压幅值、相角。

#### 3) 潮流负载指数。

在评估系统安全性时，需要对系统进行 $N-1$ 故障分析。当一条支路发生故障时，系统的潮流分布会发生较大变化，进而影响到各支路的潮流，可能会导致部分支路出现过载现象，危害电力系统的安全运行。为了反映支路的运行状态，定义支路有功潮流 $P_l$ 与支路有功潮流极限值 $P_{lmax}$ 的比值为支路负载率 $M_l$ ，即

$$M_l = \frac{|P_l|}{P_{lmax}} \quad (16)$$

系统的潮流负载指数可以表示为

$$f_3 = \sqrt{\sum_{l=1}^{N_L} M_l^2 + \frac{\sum_{c \in AC} \sqrt{\sum_{l=1}^{N_L} (M_l^{(c)})^2}}{N_C}} \quad (17)$$

$$M_l^{(c)} = \frac{|P_l^{(c)}|}{P_{lmax}} \quad (18)$$

式中： $A_C$ 为预想故障集； $N_C$ 为预想故障支路数； $M_l^{(c)}$ 和 $P_l^{(c)}$ 分别为发生 $N-1$ 故障时支路 $l$ 的负载率和有功潮流。

### 2.2 约束条件

#### 1) 等式约束。

对于电力系统而言，在正常运行情况下需要满足节点功率平衡，而对于 HPFC 接入的支路，还需要考虑 HPFC 的注入功率。故节点功率的等式约束可以表示为

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} + P_{is} = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Di} + Q_{is} = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中： $N_B$ 为系统总节点数； $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$ 分别为节点 $i$ 上发电机的有功和无功功率； $P_{Di}$ 、 $Q_{Di}$ 为节点 $i$ 上的有功和无功负荷； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 为节点导纳矩阵中的元素； $\theta_{ij}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的相角。

#### 2) 不等式约束。

对于控制变量 $u$ ，有：

$$\begin{cases} P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \\ V_{Gmin} \leq V_G \leq V_{Gmax} \\ V_{shmin} \leq V_{sh} \leq V_{shmax} \\ 0 \leq V_{se} \leq V_{semax} \\ 0 \leq \theta_{se} \leq 2\pi \\ 0 \leq V_{cr} \leq V_{crmax} \\ 0 \leq \theta_{cr} \leq 2\pi \end{cases} \quad (20)$$

式中， $P_{Gmax}$ 、 $P_{Gmin}$ 为发电机有功出力上下限； $V_G$ 为 PV 节点电压幅值； $V_{Gmax}$ 、 $V_{Gmin}$ 为 PV 节点电压幅值上下限； $V_{sh}$ 为 HPFC 并联侧定电压值； $V_{shmax}$ 、 $V_{shmin}$ 为并联侧定电压值的上下限； $V_{semax}$ 和 $V_{crmax}$ 为 UPFC 和 ST 串联侧输出电压幅值极限值。

对于状态变量 $x$ ，有

$$\begin{cases} 0 \leq |P_l| \leq P_{lmax} \\ 0 \leq P_l^{(c)} \leq P_{lmax} \\ Q_{Gmin} \leq Q_G \leq Q_{Gmax} \\ V_{Bmin} \leq V_B \leq V_{Bmax} \\ 0 \leq S_H \leq S_{Hmax} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $Q_G$ 为发电机无功出力； $Q_{Gmax}$ 和 $Q_{Gmin}$ 为发电机的无功出力上下限； $V_B$ 为 PQ 节点的电压幅值； $V_{Bmax}$ 和 $V_{Bmin}$ 为 PQ 节点的电压幅值上下限； $S_H$ 为 HPFC 的容量； $S_{Hmax}$ 为 HPFC 的容量配置

极限值。

### 3 含 HPFC 的风电并网系统潮流优化法

本文利用 MOPSO 算法求解 2 节中的优化模型，具体计算过程见图 3。

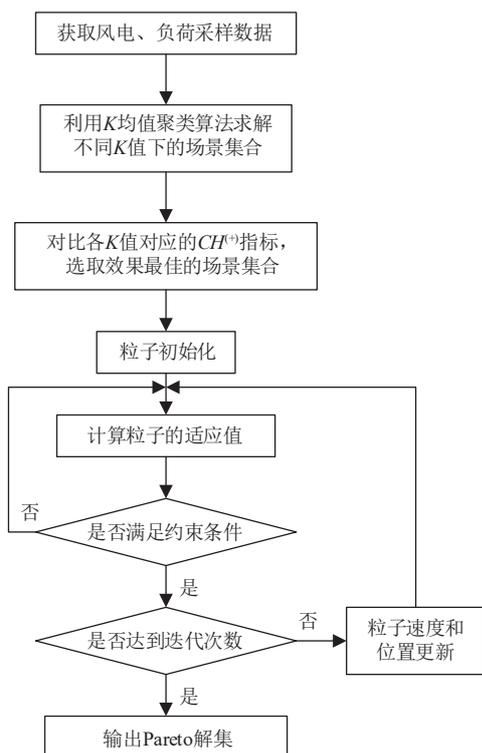


图 3 含 HPFC 的风电并网系统潮流优化计算流程图  
Fig. 3 Flowchart of power flow optimization calculation of wind power integrated system with HPFC

在 MOPSO 算法中，粒子速度和位置的更新公式如下

$$v(\delta+1) = wv(\delta) + \varepsilon_1 r_1 [a_{lbest}(\delta) - a(\delta)] + \varepsilon_2 r_2 [a_{Gbest}(\delta) - a(\delta)] \quad (22)$$

$$a(\delta+1) = a(\delta) + v(\delta+1) \quad (23)$$

式中： $\delta$  为迭代次数； $a$  为粒子的位置； $v$  为粒子的速度； $a_{lbest}$  为粒子的个体极值； $a_{Gbest}$  为粒子群的群体极值； $r_1$ 、 $r_2$  为大小在 0~1 之间的比例系数； $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  为加速度因子； $w$  为惯性因子。

加速度因子  $\varepsilon_1$  表示单个粒子对于自身个体的认知， $\varepsilon_2$  表示单个粒子对于粒子群体的认知。一般情况下， $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  应该满足条件： $0 \leq \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \leq 4$ 。惯性因子使 PSO 能够有效地控制粒子的搜索区域，在全局调节和局部搜索方面更加灵活。在  $w$  较大

的情况下，PSO 算法可以得到更大的搜索区域；反之，PSO 算法的搜索区域就会变小。

在多场景优化中，粒子的总适应度值为粒子在各场景中的适应度值乘以场景概率的总和，根据解的支配关系选择  $a_{lbest}$ 。将每个解的适应度值转换成概率，再进行随机抽选，得到的结果为  $a_{Gbest}$ 。

由于多目标相互之间存在差异性，优化问题的可能同时存在多个解，因此通过 MOPSO 求解得到的结果为一个最优解的集合，即 Pareto 解集。本文通过计算 Pareto 解的模糊满意度来选取最合适的解，第  $\beta$  个目标函数满意度  $\tau_\beta$  的计算公式为

$$\tau_\beta = \frac{f_{\beta\max} - f_\beta}{f_{\beta\max} - f_{\beta\min}} \quad (24)$$

式中： $f_\beta$  为第  $\beta$  个目标函数的值； $f_{\beta\max}$  和  $f_{\beta\min}$  分别为解集中第  $\beta$  个目标函数的最大值和最小值。

每个 Pareto 解的满意度  $\tau$  可以表示为

$$\tau = \frac{1}{N_F} \sum_{\beta=1}^{N_F} \tau_\beta \quad (25)$$

式中： $N_F$  为单个解中目标函数的个数。

### 4 算例分析

本文在 IEEE-14 节点算例中加装风电场和 HPFC 进行潮流优化计算。风电场 W1 和 W2 分别位于节点 3 和节点 6 位置，HPFC 位于支路 9—10，且以节点 10 作为其并联侧节点，如图 4 所示。

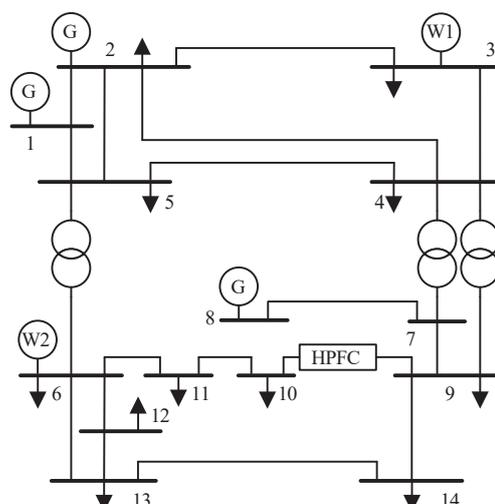


图 4 含 HPFC 和风电场的 IEEE-14 节点系统拓扑  
Fig. 4 Topology of IEEE 14-bus system with HPFC and wind farm

#### 4.1 风电、负荷场景计算

聚类所采用的样本来自 EirGrid 网站上 2020 年的风电、负荷数据，通过 1.2 节提到的 K 均值聚类算法，分别在  $K$  为 2~15 的情况下建立风电、负荷场景集合，得到在不同  $K$  值下的  $CH^{(+)}$  指标如图 5 所示。

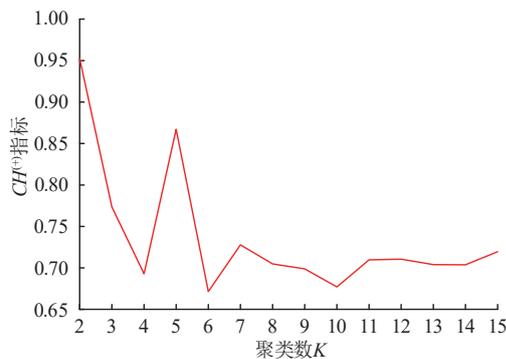


图 5  $CH^{(+)}$  指标曲线图

Fig. 5 Diagram of  $CH^{(+)}$  index

从图 5 可以看出，当  $K=2$  或 5 时， $CH^{(+)}$  指标相对较大。从考虑聚类场景有效性和与原始数据相似性的角度出发，选取聚类数为 5 时的聚类结果进行后续计算，将得到的 5 个聚类分别记为场景 1—5，由式 (12) 可以计算得到各场景的出现概率。最终，各场景概率、负荷水平和风电场的有功出力见表 1。

表 1 场景 1—5 的出现概率及风电、负荷数据

Table 1 Probability, wind power output and load in scene 1 to 5

场景	概率 $\lambda_i/\%$	负荷水平	风电场有功出力	
			W1/MW	W2/MW
场景1	21.29	1.00	16.75	8.37
场景2	24.08	0.71	26.16	13.08
场景3	22.36	0.76	85.03	42.51
场景4	16.00	1.05	61.93	30.96
场景5	16.27	1.09	116.89	58.44

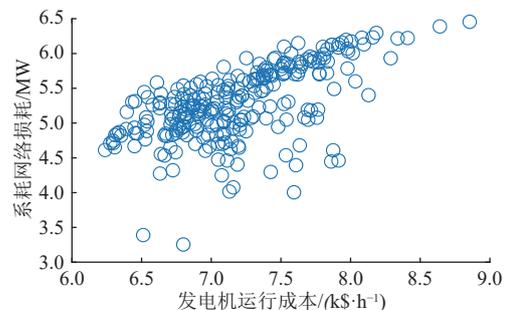
#### 4.2 优化模型求解

求解 MOPSO 算法的相关参数涉及如下：粒子群的种群数为 50；最大迭代次数为 300 次；惯性因子  $w = 0.729$ ；加速度因子  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.8$ ；HPFC 的最大容量为 200 MVA；ST 的输出电压幅值上限  $V_{crmax} = 0.1$  pu，抽头数量为 3；UPFC 的输出电压幅值上限为  $V_{semax} = 0.0289$  pu；系统的容量基准

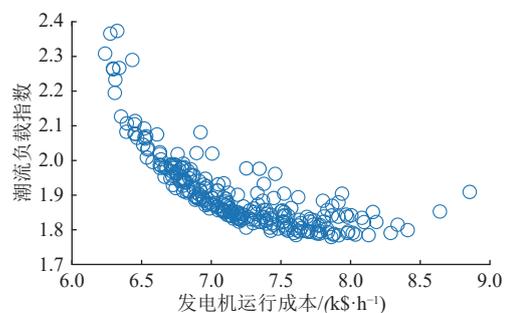
值为 100 MVA；其余参数均为 MATLAB 中 IEEE-14 节点算例的默认值。

为了验证本文所提算法的有效性，对比分析未考虑风电场景和考虑风电场景情况下的目标函数优化结果。在未考虑风电场景的情况下，风电出力为常数，只采用场景 1 的参数进行优化计算（以下记为单场景优化）。在考虑风电场景情况下，采用本文所提算法，对场景 1~5 进行综合性优化计算（以下记为多场景优化）。计算在单场景优化和多场景优化下的 Pareto 解集，并依据式 (24)、(25) 计算各 Pareto 解的满意度，进而选出折衷解。将多场景优化下的 Pareto 解集投射到不同的二维平面上，如图 6 所示。

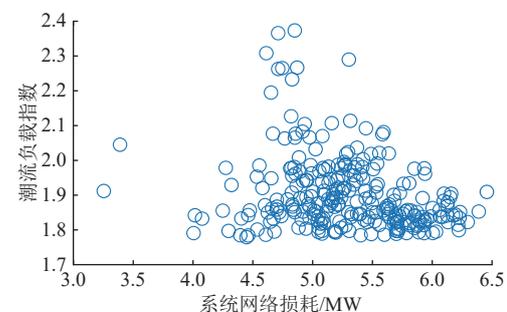
从图 6 可以看出，发电机运行成本与系统网



(a) 在“发电机运行成本-系统网络损耗”平面的二维投影



(b) 在“发电机运行成本-潮流负载指数”平面的二维投影



(c) 在“系统网络损耗-潮流负载指数”平面的二维投影

图 6 多场景优化的 Pareto 解集在不同二维平面上的投影

Fig. 6 Projection of Pareto solution to different two-dimensional planes of multiple scenes optimization

络损耗大致成正比,与支路负载率大致成反比,系统网络损耗与支路负载率之间关联性不大。

依据无优化、单场景优化和多场景优化下的系统控制参数,计算在各场景中的目标函数值,再依据各场景概率进行加权相加,得到各优化方法在风电场景下的目标函数值见表2。

表2 优化结果对比

Table 2 Comparison of optimization results

优化方法	发电机运行成本/(k\$/h)	系统网络损耗/MW	潮流负载指数
无优化	11.2429	6.7068	3.0334
单场景	9.3490	2.7513	2.8502
多场景	6.7990	3.2540	1.9119

从表2可以看出,发电机运行成本在单场景和多场景优化方法下分别减少了16.85%、39.53%,系统网络损耗在单场景和多场景优化方法下分别减少了58.98%、51.48%,潮流负载指数在单场景和多场景优化方法下分别减少了6.04%、36.97%,经过优化后,系统经济性和安全性都得到了明显提高。对比2种优化方法,多场景优化方法虽然对于系统网络损耗的优化效果略差于单场景优化方法,但其对于发电机运行成本和潮流负载指数的优化效果都明显优于单场景优化方法。

为了更近一步比较单场景优化方法和多场景优化方法的优化效果,图7给出了不同场景下各优化方法计算得到的发电机运行成本。图8给出了在场景4中支路13(即支路6—13)发生N-1故障时各优化方法计算得到的支路负载率。

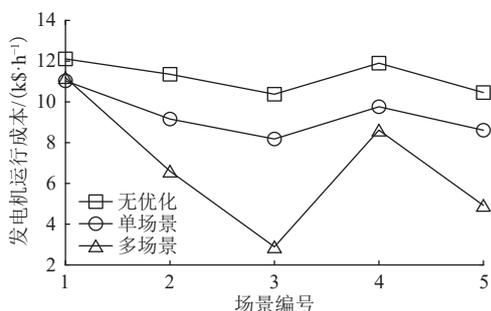


图7 发电机运行成本对比

Fig. 7 Comparison of generator operation cost

从图7可以看出,基于场景1的单场景优化方法仅对于场景1的发电机运行成本优化效果较好,而对于其他场景的发电机运行成本优化效果远不如多场景优化方法。

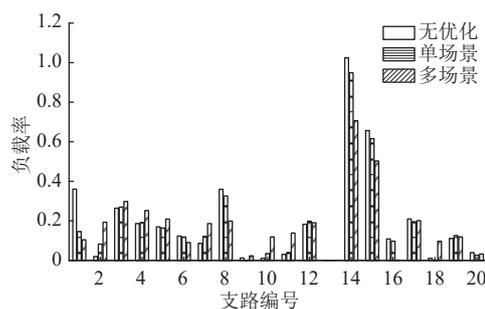


图8 场景4中支路13断线时支路负载率对比

Fig. 8 Comparison of load rate with the open circuit fault of line 13 in scene 4

从图8可以看出,当未安装HPFC时,支路14出现了潮流过载,存在很大的安全隐患。而安装HPFC后支路14的负载率得到了改善,潮流过载得到了消除。与基于场景1的单场景优化方法相比,多场景优化方法对于支路14负载率的优化效果更为显著,且各支路负载率的分布更加均匀。

综上所述,单场景优化方法应用于风电并网系统进行潮流优化计算会得到在特定场景下的最优结果,对于其他场景的优化效果较差,计算结果存在局限性。而多场景优化方法能充分计及不同场景之间的差异性,得到适用多种场景的优化方案。

## 5 结论

从仿真结果可以得出,在风电并网系统中接入HPFC后,通过调节HPFC和发电机的参数,系统的潮流过载问题得到了解决,电网经济性和安全性都得到了明显提高,且本文所提优化方法对于目标函数的总体优化效果优于单场景优化方法。因此,本文提出的含HPFC的风电并网系统潮流优化方法在考虑支路潮流负载率后可以有效解决风电并网存在的潮流过载问题,且相较于单场景优化更能充分计及电网的不确定性,保障电力系统在多种工况场景下的正常运行。

### 致谢

本文得到国网河北省电力有限公司科技项目《面向新型电力系统的混合潮流控制器设计方案和配置方法研究项目》(SGHEJY00NYJS2100063)的资助,谨此深表感谢。

## 参考文献

- [1] 姚良忠,朱凌志,周明,等.高比例可再生能源电力系统的

- 协同优化运行技术展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 12-18.
- YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, *et al.* Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(8): 12-18 (in Chinese).
- [2] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(2): 163-170.
- LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, *et al.* Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(2): 163-170 (in Chinese).
- [3] 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).
- [4] 苏田宇, 杜文娟, 王海风. 并网风电场次同步振荡抑制措施研究综述[J]. *南方电网技术*, 2018, 12(4): 60-69.
- SU Tianyu, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Review of sub-synchronous oscillation suppression measures for grid-connected wind farms[J]. *Southern Power System Technology*, 2018, 12(4): 60-69 (in Chinese).
- [5] GALVANI S, HAGH M T, SHARIFIAN M B B, *et al.* Multiobjective predictability-based optimal placement and parameters setting of UPFC in wind power included power systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(2): 878-888.
- [6] XIE Z Q, JI T Y, LI M S, *et al.* Quasi-Monte Carlo based probabilistic optimal power flow considering the correlation of wind speeds using copula function[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(2): 2239-2247.
- [7] FANG X, SEDZRO K S, YUAN H, *et al.* Deliverable flexible ramping products considering spatiotemporal correlation of wind generation and demand uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(4): 2561-2574.
- [8] 陈金富, 孙鑫, 段献忠, 等. 基于机会约束规划的含风电场电力系统可用输电能力计算[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(23): 6804-6814, 7094.
- CHEN Jinfu, SUN Xin, DUAN Xianzhong, *et al.* A chance-constrained approach for available transfer capability evaluation for power systems with wind farm integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(23): 6804-6814, 7094 (in Chinese).
- [9] UGRANLI F, KARATEPE E. Transmission expansion planning for wind turbine integrated power systems considering contingency[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 1476-1485.
- [10] 谢毓广. 计及网络安全约束和风力发电的机组组合问题的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [11] MOHAMED A A R, SHARAF H M, IBRAHIM D K. Enhancing distance protection of long transmission lines compensated with TCSC and connected with wind power[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 46717-46730.
- [12] DAWN S, KUMAR TIWARI P, KUMAR GOSWAMI A, *et al.* An approach for system risk assessment and mitigation by optimal operation of wind farm and FACTS devices in a centralized competitive power market[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 1054-1065.
- [13] CHEN Baichao, FEI Wenli, TIAN Cuihua, *et al.* Research on an improved hybrid unified power flow controller[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(6): 5649-5660.
- [14] ZHANG X, HANDSCHIN E, YAO M. Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, 16(3): 367-373.
- [15] 高雯曼, 任建文, 申旭辉, 等. 基于断面负载均衡度的统一潮流控制器潮流优化控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(24): 79-85.
- GAO Wenman, REN Jianwen, SHEN Xuhui, *et al.* Control method of power flow optimization for unified power flow controller based on section load balance degree[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 79-85 (in Chinese).
- [16] 吴熙, 王梦婷, 王亮, 等. 考虑UPFC控制模式的N-1安全约束最优潮流及应用[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(9): 43-51.
- WU Xi, WANG Mengting, WANG Liang, *et al.* N-1 security constrained optimal power flow considering control modes of unified power flow controller and its application[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(9): 43-51 (in Chinese).
- [17] TAHER MAHROUS A, KAMEL S, JURADO F, *et al.* Optimal power flow solution incorporating a simplified UPFC model using lightning attachment procedure optimization[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(1): 1-25.
- [18] MURUGAN A, RAMAKRISHNAN V. Power flow con-

- trol and voltage profile improvement using HPFC with genetic algorithm[C]//2019 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Melmaruvathur, India, 2019.
- [19] TAMIMI B, CAÑIZARES C, BATTISTELLI C. Hybrid power flow controller steady-state modeling, control, and practical application[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1483–1492.
- [20] 姚尧, 邱昊, 陈柏超, 等. 一种新型统一潮流控制器[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(16): 78–82.  
YAO Yao, QIU Hao, CHEN Baichao, *et al.* A novel unified power flow controller[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(16): 78–82(in Chinese).
- [21] 丁明, 解蛟龙, 刘新宇, 等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(15): 1–9.  
DING Ming, XIE Jiaolong, LIU Xinyu, *et al.* The generation method and application of wind resources/load typical scene set for evaluation of wind power grid integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(15): 1–9(in Chinese).

收稿日期: 2022-08-09

作者简介:

袁博(1989), 男, 硕士, 工程师, 通信作者, 研究方向为能源战略分析、电力数据分析、电网规划设计等, E-mail: [yuanbo7396@163.com](mailto:yuanbo7396@163.com);

关辰皓(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制等, E-mail: [1585563162@qq.com](mailto:1585563162@qq.com);

吴熙(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、新能源发电与并网技术等, E-mail: [wuxi@seu.edu.cn](mailto:wuxi@seu.edu.cn)。