

# 考虑风速相关性的多目标电网规划

刘 学1.李 晖2,周 明1,郭 飞2,李庚银1

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206;2. 国网北京经济技术研究院,北京 102209)

摘要:多个风电场之间的风速相关性会影响潮流分布,进而影响输电网规划方案。采用逆 Nataf 变换建立风速相关性模型。结合基于半不变量法的概率潮流和机会约束规划,综合考虑经济性、电网负载均衡度、环保效应3个指标,构建考虑风速相关性的含风电场多目标电网优化规划模型。针对多目标优化问题的求解,提出一种改进 NSGA-II,该算法采用控制参数动态调整策略,提高了算法的全局搜索性能。采用基于熵的序数偏好方法对最优解集进行排序,给出决策方案。IEEE 24 节点系统和某区域实际算例证明了所提模型的合理性和方法的有效性。研究结果表明,风速相关性对目标分量有重要的影响,考虑风速相关性能够给出更准确的电网规划方案。

关键词:风电:半不变量法:不确定性:多目标优化:输电网规划

中图分类号: TM 614; TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.013

## 0 引言

风电具有随机性和波动性,大规模风电并网给 电网规划中的潮流计算带来了不确定因素印。随 着风电并网规模的增大、电网结构复杂度的增强、 环保意识的提高,电网规划面临新的挑战,这已经 引起国内外学者的广泛关注。文献[2]考虑环保效 应,建立了风电接入的多目标电网规划模型,但没有 考虑风速之间的相关性。文献[3]建立了基于动态 碳排放价格的电网规划模型,但未详细讨论大规模 风电对电网规划的影响。文献[4]构建了以投资成 本、弃风量和切负荷量之和为目标的双层规划模型; 文献[5]建立了输电网规划概率模型。这些研究关 注了电网规划的经济性和环保性方面,但在表征电 网结构均匀度方面和考虑风速相关性对电网规划 的影响方面尚有不足。文献[6]研究了风速相关性 对配电网运行特性和风电最大装机容量的影响。在 输电网规划方面,对考虑风电出力随机性的概率潮 流计算方法[7-9]已有大量的研究,但都是假设各风 电节点的注入功率是相互独立的。事实上,地理位 置相近的多个风电场之间的风速具有较强的相关 性。如果不考虑这种相关性,会导致概率潮流出现 较大的误差,使电网规划结果偏离实际情况。目前 尚缺乏文献研究风速相关性对电网规划和环境效 益的影响。因此,本文基于逆 Nataf 变换技术建立 风速相关性模型,并将其与基于半不变量法的概率 潮流结合,分析风速相关性对风电出力、网架结构 及环境效益的影响,再进一步结合机会约束规划方法,考虑负荷不确定性进行多目标电网规划方法建模。

电网规划一般为多目标非线性优化问题,传统思路是将多目标转换成单目标问题进行求解[10-12],涉及到的方法有多目标权重法、模糊集分析方法、分层优化方法、模糊评价法,这些方法可以得到一个最优解,但当涉及目标较多时,其权重选择困难,各个因素难以协调统一,在实际运用中效果不理想,因而直接进行多目标优化的进化算法得到广泛认可,比如遗传算法、粒子群算法、差分进化算法、Tabu 搜索法等现代启发式算法均取得了一定效果。但在多目标优化问题的适用性上,还需要进一步研究。

考虑多风电场之间的相关性,本文构建了综合考虑经济性、电网负载均衡度以及环境效益的多目标电网规划模型。以线路的投资成本反映经济性,以线路负载率方差刻画电网负载均衡度,以最小 CO2排放量表征环境效益,研究风速相关性对于各目标分量及规划方案的影响。在模型的求解中,采用计及输入相关性的半不变量法求解概率潮流,采用改进非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解多目标的 Pareto 最优解集,并以熵的序数偏好方法对最优解集进行排序,得到最终规划方案。以改进的 IEEE 24 节点测试系统和我国某区域实际系统进行算例分析,结果表明了所提模型和算法的合理性和有效性。

#### 1 考虑风电相关性的概率直流潮流

概率潮流可以很好地处理风机和负荷的不确定性。在电网规划中,将线路的过负荷概率当作一个约束条件,通过控制线路的过负荷概率,来确保系统以一定的概率满足不确定信息下系统安全性的要求。假设发电机出力可调,负荷服从正态分布。

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA-050208)

收稿日期:2014-12-16;修回日期:2015-08-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA-050208)

#### 1.1 风速相关性模型

大量的风速实测数据表明,大部分地区的年平均风速分布均符合 Weibull 分布,故本文以两参数 Weibull 分布来模拟风速分布。其概率密度函数和概率分布函数表达式[7]分别如式(1)、(2)所示。

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ -\left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \tag{1}$$

$$F_v(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \tag{2}$$

其中,v 为风速;c 为尺度参数;k 为形状参数。

对于已知风速累积分布函数  $F_v(v)$ 以及相关系数矩阵  $\rho_v$  的情况下,可采用逆 Nataf 变换生成给定相关系数的风速样本,步骤如下[ $^{13}$ ]。

步骤 1 利用蒙特卡洛抽样生成独立标准正态分布变量 E 的样本  $E_{so}$ 

步骤 2 对相关系数矩阵 $\rho_v$ 进行转换,得到相关系数矩阵 $\rho_v$ ,其非对角元素由下式求得:

$$\rho_{xij} = D(\rho_{vij})\rho_{vij} \tag{3}$$

其中, $D(\rho_{vij})$ 由 Weibull 分布的等效相关系数经验计算公式求得[14],如式(4)所示。

$$D(\rho_{vij}) = 1.063 - 0.004 \rho_{vij} - 0.2 \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j}\right) - 0.001 \rho_{vij}^2 +$$

$$0.337 \left[\left(\frac{\sigma_i}{\mu_i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_j}{\mu_j}\right)^2\right] + 0.007 \rho_{vij} \left(\frac{\sigma_i}{\mu_i} + \frac{\sigma_j}{\mu_j}\right) -$$

$$0.007 \frac{\sigma_i}{\mu_i} \frac{\sigma_j}{\mu_j}$$

$$(4)$$

步骤 3 对 $\rho_x$  进行 Cholesky 分解得到下三角阵  $G_X$ ,通过式(5)得到相关系数矩阵为 $\rho_x$  的样本  $X_s$ 。

$$X_{s} = G_{Y} E_{s} \tag{5}$$

步骤 4 以等概率转换原则即可生成相关系数矩阵为 $\rho$ 。的风速样本V。。

$$V_{s} = F^{-1}(\Phi(X_{s})) \tag{6}$$

其中, $F^{-1}(\cdot)$ 表示进行等概率转换; $\Phi$  为标准正态分布变量样本的累积密度函数。

#### 1.2 相关性输入变量的处理

由于基于半不变量法的概率潮流要求输入变量相互独立,这就需要将相关的输入变量转换成不相关的输入变量。相关系数矩阵 $\rho$ 为对称矩阵,则存在一正交矩阵B,使得相关的输入变量p转换成不相关的变量 $q^{[7]}$ 。

$$q = Bp \tag{7}$$

变量 q 的相关系数矩阵  $C_q$  为单位矩阵 I,结合式(7),有:

$$C_q = \operatorname{cov}(q, q^{\mathrm{T}}) = \operatorname{cov}(Bp, p^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}) =$$

$$B\operatorname{cov}(p, p^{\mathrm{T}})B^{\mathrm{T}} = (BG)(BG)^{\mathrm{T}} = I$$
由上式可知  $B = G^{-1}$ ,代人式(7)中可得:

$$q = G^{-1}p \tag{9}$$

已知相关输入变量p的基础上,通过式(9)可将具有相关性的输入变量p表示成不相关的变量q的线性组合。

$$p = Gq \tag{10}$$

#### 1.3 计及风速相关性的半不变量概率直流潮流

针对电网规划所需的有功功率概率分布,本文 采用概率直流潮流。线路上的有功功率与节点注入 有功功率之间的关系为:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{L}} = \mathbf{A} \mathbf{P}_{\mathrm{N}} \tag{11}$$

其中, $P_L$ 为线路潮流向量;矩阵 A 为节点注入功率与线路潮流之间的关系矩阵,可以由节点导纳矩阵的虚部阵 B 直接求得; $P_N$  为节点注入功率向量。

计及相关性的半不变量的求取,需要在独立输入变量半不变量求取的基础上,对节点注入功率的 *m* 阶半不变量进行修正。

当不同节点的注入功率  $p_1, p_2, \cdots, p_m$  具有相关性,并且相关系数矩阵已知时,通过式(9)可以得到不相关的变量  $q_1, q_2, \cdots, q_m$ ,再由式(10)将 m 个具有相关性的节点注入功率表示成不相关的变量  $q_1, q_2, \cdots, q_m$  的线性组合。这样输入变量不相关,便可得到支路潮流功率的各阶半不变量,进而可采用级数展开方法求取其概率分布。目前,基于半不变量计算输出变量概率分布的级数方法主要有 Gram-Charlier级数、Edgeworth 级数和 Cornish-Fisher 级数。 其中Cornish-Fisher 级数在计算非正态分布变量的概率分布时具有更高的精度[15],因此,本文采用 Cornish-Fisher 级数计算支路潮流的概率分布。计及风速相关性的概率潮流具体流程如图 1 所示。

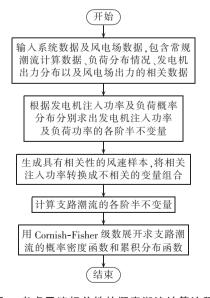


图 1 考虑风速相关性的概率潮流计算流程 Fig.1 Flowchart of probability power flow calculation considering wind speed correlation



# 2 多目标电网规划模型

## 2.1 多目标优化问题

多目标优化问题一般定义如下:

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \cdots, f_n(\mathbf{x})]^{\mathrm{T}}$$
s.t.  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$  (12)
$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$$

其中,x为解向量;F(x)为目标函数向量;n为目标函数个数;h(x)为等式约束;g(x)为不等式约束。一般而言,多目标优化问题没有一个使所有目标函数均为最优的解,因而采用的多是 Pareto 最优解。Pareto 最优解的评价标准由两方面组成:所获得的非劣最优解集应尽可能接近真实的 Pareto 前沿;所获得的 Pareto 最优解应沿着 Pareto 前沿尽可能地均匀分布。

# 2.2 考虑环境因素的多目标电网规划数学模型

#### 2.2.1 目标函数

本文以单时段静态多目标电网扩展规划为例进行建模。综合考虑电网的投资运行费用、电网负载均衡度,相应的多目标函数如下。

## (1)经济性指标。

$$\min f_1 = \sum_{i j \in O} c_{ij} n_{ij} + K \sum_{i=1}^{N} (r_i P_{Li}^2 / U_i^2) + \alpha P_{\alpha}$$
 (13)

其中, $c_{ij}$ 为节点 $i_{x}$ ,j之间新建线路的费用; $n_{ij}$ 为节点 $i_{x}$ ,j之间的线路数量; $\Omega$ 为新建线路集合;K为年网损费用系数; $r_{i}$ 为支路i的电阻; $P_{Li}$ 为支路i传输的有功功率; $U_{i}$ 为支路i的电压; $\alpha$ 为过负荷惩罚系数; $P_{\alpha}$ 为系统过负荷量。

## (2)电网负载均衡度。

电网负载均衡度是指电网中输电线路负载率的分布情况。电网规划中,可能出现个别线路重载或轻载的现象,重载线路会导致电网安全性降低,规划结果滞后;轻载线路会导致电网运行的经济性较差,规划结果超前。因此,在追求经济性的同时,提高电网的安全性、避免规划方案支路中出现重载和轻载尤为重要。本文采用负载率方差作为目标函数,体现支路负荷波动限制,使线路利用率更合理。

$$\min f_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{Li}}{\overline{P}_{Li}} - \widetilde{P} \right)^2$$
 (14)

其中, $P_{Li}$ 为支路 i 传输的有功功率; $\overline{P}_{Li}$ 为支路 i 允许的最大传输功率; $\overline{P}$ 为支路负载率均值。

#### (3)CO<sub>2</sub>排放量。

$$\min f_3 = \sum E_k g_k \tag{15}$$

其中, $E_k$  为第 k 个发电机发出单位 MW 功率产生的  $CO_2$  量; $g_k$  为可调发电机的出力。

#### 2.2.2 约束条件

$$-Y\theta + P_{\rm G} + P_{\rm w} + r = P_{\rm D} \tag{16}$$

$$P_{L} = AP_{N} \tag{17}$$

$$P\{|P_{ii}| \leq (n_{ii}^0 + n_{ii})\overline{P}_{ii}\} \geq \beta \tag{18}$$

$$\boldsymbol{P}_{G}^{\min} \leq \boldsymbol{P}_{G} \leq \boldsymbol{P}_{G}^{\max} \tag{19}$$

$$0 \leqslant P_{\mathbf{w}} \leqslant P_{\mathbf{w}}^{\text{max}} \tag{20}$$

$$0 \leqslant r \leqslant P_{D} \tag{21}$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n}_{ij} \tag{22}$$

其中, $P\{\cdot\}$ 表示求概率; $n_{ij}$ 、 $\overline{n}_{ij}$  分别为待扩建走廊 i-j 原有回路数和允许最大回路数;Y、 $\theta$ 、 $P_{c}$ 、 $P_{w}$ 、r,  $P_{D}$  分别为节点导纳矩阵、节点电压相角、常规机组出力、风电场出力、切负荷量、节点负荷列向量; $P_{ij}$  和 $\overline{P}_{ij}$  分别为线路有功潮流和功率极限; $P_{\overline{c}}$  和 $P_{\overline{c}}$  分别为常规机组出力上、下限; $P_{\overline{w}}$  为风电场出力上限; $\beta$  为机会约束中输电网络不过负荷的概率,一般大于 0.95。

式(16)、(17)为直流潮流约束等式;式(18)为 支路潮流约束;式(19)—(22)分别为发电机有功出 力约束、风机有功出力约束、切负荷上限约束、可架 线路走廊的架线数目约束。

## 3 改进 NSGA-Ⅱ

#### 3.1 NSGA-II及其控制参数的改进

NSGA-II是对传统遗传算法的一种改进,是目前最流行的多目标进化算法之一,它降低了非劣排序遗传算法的复杂性,具有运行速度快、解集收敛性好的优点。算法中,变异因子F和交叉因子 $C_R$ 的取值对算法的搜索效率和收敛性影响很大。而NSGA-II的进化操作机制采用传统遗传算法的交叉和变异机制,容易产生局部最优以及进化过程不稳定等问题。因此本文采用差分进化算法中的控制参数动态调整策略,增强后期局部搜索能力,从而保证了算法的收敛性,方法如下:

$$F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \frac{K_{n}}{1 - K_{n}/K_{\max}}$$
 (23)

$$C_{\rm R} = C_{\rm Rmin} + (C_{\rm Rmax} - C_{\rm Rmin}) \frac{K_{\rm n}}{1 - K_{\rm n}/K_{\rm max}}$$
 (24)

其中, $F_{\text{max}}$ 、 $F_{\text{min}}$ 分别为交叉因子的上、下限; $C_{\text{Rmax}}$ 、 $C_{\text{Rmin}}$ 分别为变异因子的上、下限; $K_{\text{n}}$  为当前迭代次数; $K_{\text{max}}$  为最大迭代次数。

#### 3.2 Pareto 非支配排序

对于多目标优化问题,不仅要尽可能多地找到Pareto 最优解,还需要使Pareto 前沿在各个目标空间中均匀分布。NSGA-II采用快速非支配排序,对种群进行快速分层,计算同一非支配等级个体的拥挤度并进行选择,使得个体能在Pareto 域中均匀分布。另外,通过精英策略扩大了采样空间,保留了父代的优良个体。这样,在准Pareto 最优解集中,不仅保持了种群的多样性,还使得个体均匀分布。

#### 3.3 多属性决策方法

多目标优化问题最终得到一组 Pareto 最优解

集,需要根据决策者偏好从 Pareto 最优解集中选取出一个最优折中解。目前比较常用的一种方案是逼近理想方案序数偏好的方法(TOPSIS)[16],其目标就是使得所选择的方案与理想方案的差距最小,并且与负理想方案的差距最大。但是权重一般情况下是很难给出的。因此可以采用熵权选取方法。如果指标的信息熵越小,该指标提供的信息量越大,在综合评价中所起作用就越大,权重就应该越高。反之,熵值越大,指标权重应该越小。在信息论中,熵用来衡量不确定性的程度。当变量的不确定程度越大,熵值也就越大。

#### 3.4 基于改进 NSGA-Ⅱ 的多目标电网规划求解步骤

本文对 NSGA-II 进行改进,采用差分进化算法中的动态控制参数的调整策略。保留了 NSGA-II 中快速非劣排序、个体拥挤度比较以及精英保留策略,使其更适用于求解多目标问题。本文求解多目标电网规划问题的步骤如图 2 所示。

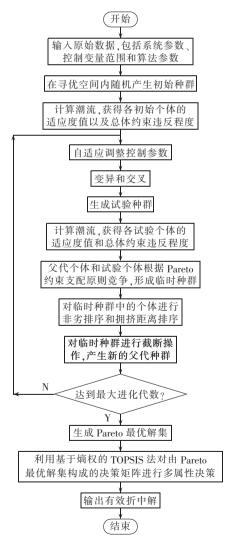


图 2 非支配排序差分进化算法的多目标电网规划流程 Fig.2 Flowchart of multi-objective power grid planning based on non-dominated sorting differential evolution algorithm

#### 4 算例分析

首先以 IEEE 24 节点系统为例进行计算分析。系统中节点数据、支路数据和可扩建走廊数参见文献 [17],该系统有 41 条支路,10 个发电机节点。设定风机参数为:切入风速  $v_{\rm ci}$ =4 m/s、额定风速  $v_{\rm rate}$ =10 m/s、切出风速  $v_{\rm ci}$ =22 m/s,风电场风速期望值  $E_{\rm wind}$ =5.4 m/s,标准差  $\sigma_{\rm wind}$ =2.7 m/s。单位长度线路投资费用  $C_{ij}$ =80 万元/km,功率基准值为 100 MW。风电场在节点 24、9 并网,每个节点并网规模为 250 MW,如图 3 所示。发电机类型如表 1 所示,并且不同类型的机组具有不同的碳排放强度 [17],如表 2 所示。

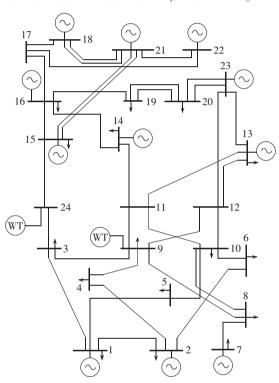


图 3 IEEE 24 节点风机并网系统图 Fig.3 IEEE 24-bus system with gridconnected wind turbines

表 1 IEEE 24 节点系统电源类型

Table 1 Power source types of IEEE 24-bus system

节点	电源类型	最大功率/MW
1	水力发电机	40
1	火力发电机	152
2	水力发电机	40
2	火力发电机	152
7	燃气、风力、光伏协同发电	150
13	燃气、风力、光伏协同发电	591
15	水力发电机	60
15	火力发电机	155
16	火力发电机	155
18	核能发电机	400
21	核能发电机	400
22	燃气、风力、光伏协同发电	300
23	火力发电机	310
23	火力发电机	350

表 2 不同机组的 CO, 排放强度

Table 2 CO<sub>2</sub> emission intensity of different units

电源类型	CO <sub>2</sub> 排放强度/[t·(MW·h) <sup>-1</sup> ]
火力发电机	0.88
燃气、风力、光伏协同发电	0.37
核能发电机	0
水力发电机	0

#### 4.1 考虑风电相关性的概率直流潮流分析

图 4 为 3 对不同风速相关程度的两风电场总输出功率的频率分布图,图中总输出功率为标幺值。

从图中可以看出,风速相关程度越高,两风电场的总输出功率分布在零出力和最大出力的概率越大。而风速相关程度越低,两风电场的峰和谷到达时间相差越大,零出力和最大出力出现的时刻也相差越大,风电场的总输出功率"叠加"趋势不明显。

本文采用半不变量结合 Cornish-Fisher 级数展开的方法进行概率直流潮流计算。为了对比,选取蒙特卡洛仿真 10000次,得到支路有功功率累积分布函数曲线,选取支路 1-5 的有功功率累积概率分布曲线为例,结果示于图 5,图中支路 1-5 有功功

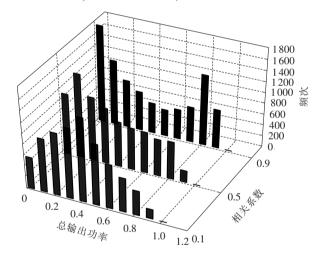


图 4 不同风速相关系数下风电场总出力概率分布 Fig.4 Probability distribution of total wind farm outp

Fig.4 Probability distribution of total wind farm output for different wind speed correlation coefficients

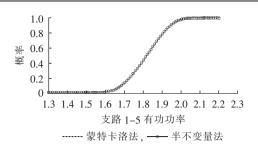


图 5 支路 1-5 有功功率分布

Fig.5 Reactive power distribution of branch 1-5

率为标幺值。曲线对比表明所提方法的计算结果与蒙特卡洛法几乎一致,证明了所提方法有很高的精度。而采用半不变量法时,计算时间为 0.1724 s,采用蒙特卡洛法的计算时间为 91.3048 s,计算速度得到了大幅提高,提高了运算效率。

## 4.2 考虑风电相关性的优化方案分析

#### 4.2.1 IEEE 24 节点测试系统

本文的改进 NSGA-II 参数如下:种群规模  $N_P$ = 100,最大迭代次数  $K_{max}$ = 200,变异因子上限  $F_{max}$ = 0.8,下限  $F_{min}$ = 0.3,交叉因子上限  $C_{Rmax}$ = 0.8,下限  $C_{Rmin}$ = 0.3。

为了描述风电相关性对输电网扩展规划的影响,分别对风电场不相关以及风电场3种不同相关系数的情况进行计算,并以基于熵权的TOPSIS法进行决策,选出最优方案。计算结果如表3所示。

由表 3 对比可知,随着风电场相关程度越高,风电场的总输出功率分布有"叠加"的趋势,使得在零出力和最大出力的概率增大,风电的波动性越强。随着风电场相关系数的增加,为了保证系统的可靠性,新建线路数量也随之增多,这一特性在风电场并网节点 24、9 相邻线路尤为明显,表明风电场出力波动性给风电场并网点相邻线路带来更大的风险,需要加强建设。通过增加经济投资,提高电网的可靠性,并达到令决策者满意的水平。在电网负载均衡度方面,风电场相关系数的增加,会使得风电场出

表 3 不同风速相关系数下最优规划方案

Table 3 Optimal planning scheme for different wind speed correlation coefficients

		1 1 0	1				
相关系数	风电场 规模/MW	输电线路扩展	综合投资 费用/万元	负载率 方差	支路最大 负载率	支路最小 负载率	碳排放量/ (t·h <sup>-1</sup> )
0	2×250	1-5,2-4,3-24(3),4-9,6-10(2),7-8,9-11, 10-11,10-12,11-13,11-14,14-16,15-16, 15-24,16-17,17-18,20-23	25 078	0.0417	0.6901	0.0909	921.13
0.1	2×250	1-5,2-4,3-9,3-24(3),6-10(2),7-8,9-11, 10-11,10-12,11-13,11-14,14-16,15-16, 15-24,16-17,17-18,20-23	25 560	0.0419	0.6974	0.0894	919.65
0.5	2×250	1-5,2-4,3-9,3-24(3),6-10(2),7-8,8-9, 9-11,10-11,10-12,11-13,14-16(2), 15-16,15-24,16-17,17-18,20-23	28 827	0.0480	0.7137	0.0766	897.37
0.9	2×250	1-5,2-4,3-9,3-24(3),6-10(2),7-8, 8-9(2),9-11,10-11,10-12,11-13, 14-16(2),15-24(2),16-17,17-18,20-23	34019	0.0586	0.7563	0.0749	868.33

力的标准差增大,出力的波动性也愈大,线路的负载率方差也增大。表3中支路最大负载率随着风电场相关系数的增加而增加,而支路最小负载率随着风电场相关系数的增加而减小,说明风电场相关系数越高,风电场出力共同增大或减小的趋势越明显,使得线路最大负载率变高、最小负载率变低,电网负载均衡度变差。从环境层面来看,风电接入会替代相当一部分常规能源,使得CO2单位时间排放量减少,原系统碳排放量为1506.29 t/h,方案1—4减排量分别为585.16 t/h、586.64 t/h、608.92 t/h、637.96 t/h,能够带来可观的环境效益。考虑风电相关性时,随着网架结构的增强,风电场的出力相应增加,CO2的单位时间排放量有所减少,与不考虑风电相关性时相比差值较大。因此考虑相关性下的环境因素使规划方案数据更为精确,也更贴近于实际情况。

## 4.2.2 国内某区域电网某年电网规划方案

进一步将所建模型和算法应用于我国某区域750 kV 主干网某年的水平年电网扩展规划中,对其冬季大负荷方式进行验证计算。该区域电网的扩展规划基准年取为2014年,规划期内新增15个电源节点,其中节点26(JQ)、27(QW)、29(DH)、44(HMB)为千万千瓦级风电基地,装机容量分别为2692 MW、5548 MW、5470 MW、4500 MW。采用基于正态分布的概率模型来表示负荷增长的不确定性。750 kV线路造价为258 万元/km,待扩建线路最大回路数为3,算法的种群数为200,最大迭代次数为1000次。

本文采用 4 种方案研究风电场相关性对于电网规划的影响,方案 1—4 分别设定各个风电基地为不相关性、弱相关性、中相关性、强相关性,相关系数分别为 0、[0,0.2]、[0.4,0.6]、[0.8,0.95]。其中方案 3 在区间[0.4,0.6]的相关系数最为贴近实际情况。各个方案最优规划结果见表 4,且各个方案 N-1 情况下均不失负荷。可看出,方案 1—3 有共同的最优网架结构,但随着风电基地相关系数的提高,波动性随之

提升,一定程度上影响了线路潮流的分布,电网负载率方差增大,电网负载均衡度越来越差。与实际情况最为贴近的方案 3 对应的网架优化方案结构图参见图 6,风电基地附近线路网架均为双回 750 kV 线路,网架结构坚强。方案 4 为风电基地强相关情况,为了应对风电基地的强波动性,保证系统不失负荷以及N-1情况下不失负荷,风电基地附近网架进一步加强,相比方案 3 建设费用增加了 16.259 4 亿元,其网架结构减少了 44-45(HMB-JJM)的 1 条线路,增加了44-46(HMB-JJH)2 条线路,使走廊输电容量提升,且形成环网,形成更坚强的网络结构,保证了大量风电功率的输送。各风电基地的强相关性,使风电基地出力的波动性趋于一致,相互叠加,线路最大负载率变大,最小负载率略有变小,电网的负载均衡度变差。

随着风电场相关系数的增大,支路负载率分布 范围呈增大的趋势,但支路平均负载率却增长不明显,这是由于负载率高的支路基本为风电基地相邻 线路,数量不多,而其余大部分线路的负载率均处 于较为理想状态。以上对比说明,风电接人规模越 大,风电场地理位置越集中,风电出力的波动性就越 大,电网潮流也会大范围波动,成为重点加强区域。

从环境层面来看,前3种方案线路结构一致,虽然风电出力的波动性增加,但风电出力的期望值基本不变,其碳排放量相差不大。随着风电相关性进一步增强,方案4中风电场相邻的线路结构发生改变,网架更加坚强,使得风功率的送出能力增加,系统CO<sub>2</sub>的排放量大为降低。因此综合考虑风电的相关性,规划数据能够更贴近实际,为规划人员提供准确的数据基础。

从算法方面,对外部解进行分析,利用本文的改进 NSGA-II和 NSGA-II分别独立运算 50 次。每个子目标在每一代均会产生一个外部解。统计 2 种算法50 次运算后得到的外部解对应的目标分量平均值,绘制进化曲线如图 7 所示。

表 4 规划方案及指标对比

Table 4 Comparison of grid planning and indexes among four schemes

方案	新增线路情况	综合投资 费用/亿元	负载率 方差	支路最大 负载率	支路最小 负载率	碳排放量/ (t·h <sup>-1</sup> )
1	1-2(2),2-3,3-4,4-5,4-7,11-12(3),16-18,27-28(2),31-32, 32-33,32-39,33-34,33-38,43-44(2),44-45(2),45-46(2), 46-47(2),48-49(2),55-56,55-59(2),59-60(2),60-61(2)	135.3634	0.0541	0.8213	0.0133	26457.96
2	1-2(2),2-3,3-4,4-5,4-7,11-12(3),16-18,27-28(2),31-32, 32-33,32-39,33-34,33-38,43-44(2),44-45(2),45-46(2), 46-47(2),48-49(2),55-56,55-59(2),59-60(2),60-61(2)	135.3808	0.0552	0.8265	0.0132	26119.96
3	1-2(2),2-3,3-4,4-5,4-7,11-12(3),16-18,27-28(2),31-32, 32-33,32-39,33-34,33-38,43-44(2),44-45(2),45-46(2), 46-47(2),48-49(2),55-56,55-59(2),59-60(2),60-61(2)	135.4097	0.0627	0.8359	0.0119	25 696.45
4	1-2(2),2-3,3-4,4-5,4-7,11-12(3),16-18,27-28(3),31-32,32-33, 32-39,33-34,33-38,43-44(2),44-45,44-46(2),45-46(2), 46-47(2),48-49(2),55-56,55-59(2),59-60(2),60-61(2)	151.6691	0.0764	0.8665	0.0104	24 472.14



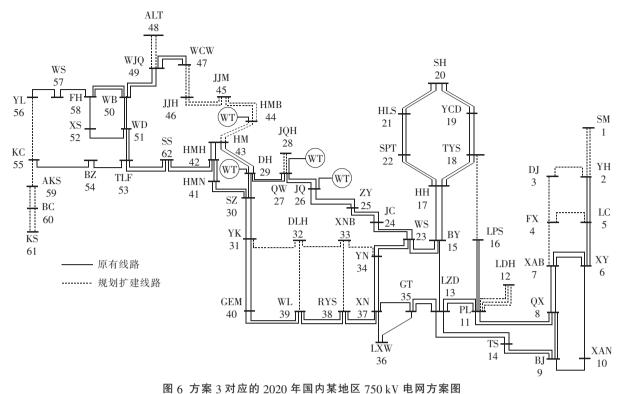


Fig. 6 2020' 750 kV grid scheme corresponding to scheme 3 for a region in China

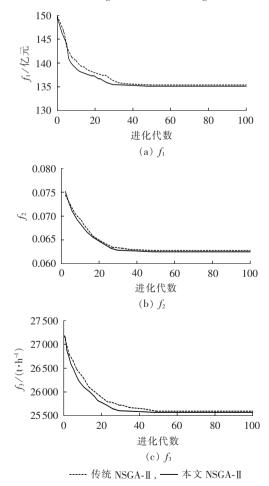


图 7 不同目标函数 2 种算法的收敛速度 Fig.7 Convergence speed of two algorithms for different objectives

从图 7 的对比可以看出,改进的 NSGA-Ⅱ 有较强的搜索能力,在 5~10 代以后收敛速度明显提高,并且从整体上来看,本文算法的稳定性和搜索能力都要优于传统算法.整体效果较好。

## 5 结论

本文建立了考虑风速相关性的半不变量法概率直流潮流计算模型;综合考虑投资经济性、电网负载均衡度、最小 CO<sub>2</sub> 排放量 3 个指标,构建了多目标电网规划模型,并给出了改进的 NSGA-II。IEEE 24 节点和实际算例验证表明:所给出的计及风速相关性的半不变量法概率直流潮流计算方法计算量小、计算速度快;多目标电网规划结果可以有效地反映不同风速相关系数下经济性、电网负载均衡度、环境因素三者之间的关系及变化趋势,能够从经济性、安全性以及环保多角度给出更均衡的规划方案。

#### 参考文献:

- [1] 武鹏,程浩忠,邢洁,等. 不确定信息下的输电网规划新模型[J]. 电力系统自动化,2008,32(13);21-25.
  - WU Peng, CHENG Haozhong, XING Jie, et al. A new transmission network planning model considering uncertain information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13):21-25.
- [2] 王茜, 张粒子. 采用 NSGA-II 混合智能算法的风电场多目标电 网规划[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19):17-24.

WANG Qian, ZHANG Lizi. Multi-objective transmission planning associated with wind farms applying NSGA-II hybrid intelligent algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19):17-24.



- [3] 田廓, 邱柳青, 曾鸣. 基于动态碳排放价格的电网规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4):57-64.
  - TIAN Kuo,QIU Liuqing,ZENG Ming. Method of grid planning based on dynamic carbon emission price[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):57-64.
- [4] 黄裕春,杨甲甲,文福栓,等. 计及接纳间歇性电源能力的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):28-34.
  - HUANG Yuchun, YANG Jiajia, WEN Fushuan, et al. Transmission system planning considering capability of accommodating intermittent generation sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4):28-34.
- [5] ORFANOS G A, GEORGILAKIS P S. Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 37(4):28-34.
- [6] 蔡德福,陈金富,石东源,等. 风速相关性对配电网运行特性的影响[J]. 电网技术,2013,37(1):150-155.
  - CAI Defu, CHEN Jinfu, SHI Dongyuan, et al. Impact of wind speed correlation on operation characteristics of distribution network [J]. Power System Technology, 2013, 37(1):150-155.
- [7] 董雷,程卫东,杨以涵. 含风电场的电力系统概率潮流计算[J]. 电网技术,2009,33(16):87-91. DONG Lei,CHENG Weidong,YANG Yihan. Probabilistic load
- flow calculation for power grid containing wind farms[J]. Power System Technology,2009,33(16):87-91.

  [8] FEIJOO A E, CIDRAS J D. Wind speed simulation in wind
- [8] FEIJOO A E, CIDRAS J D. Wind speed simulation in wind farms for steady-state security assessment of electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1582-1588.
- [9] YU H,CHUNG C Y,WONG K P,et al. A chance constrained transmission network expansion planning method with consideration of load and wind farm uncertainties[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(3):1568-1576.
- [10] GU Jie, CHEN Zhangchao, BAO Hailong. Application of mixed genetic-simulated annealing algorithms in electric network planning [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(4):

485-487.

- [11] da SILVA E L, GIL H A, AREIZA J M. Transmission network expansion planning under an improved genetic algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3);1168-1175.
- [12] CHENG Haozhong, GAO Ciwei, MA Zeliang. General optimized model of multi-objective electric power network planning [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8):1229-1232.
- [13] 石东源, 蔡德福, 陈金富, 等. 计及输入变量相关性的半不变量 法概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):104-113. SHI Dongyuan, CAI Defu, CHEN Jinfu, et al. Probabilistic load flow calculation based on cumulant method considering correlation between input variables[J]. Proceedings of the CSEE,2012, 32(28):104-113.
- [14] LIU Peiling, der KIUREGHIAN A. Multivariate distribution models with prescribed marginals and covariances [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1986, 1(2):105-112.
- [15] JASCHKE S. The cornish-fisher-expansion in the context of delta-gamma-normal approximations [J]. Journal of Risk, 2002, 4 (4):33-52.
- [16] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making-methods and applications: a state-of-art survey [M]. New York, USA; Spinge-Verlag, 1981.
- [17] KAZEROONI A K, MUTALE J. Transmission network planning under security and environmental constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2):1169-1178.

#### 作者简介:



刘 学(1987 —), 男,河北保定人,硕士,研究方向为电力系统分析与控制、电力系统规划(**E-mail**;824147354@qq.com)。

## Multiple-objective power grid planning considering wind speed correlation

LIU Xue<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, ZHOU Ming<sup>1</sup>, GUO Fei<sup>2</sup>, LI Gengvin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The wind speed correlation among multiple wind farms may influence the power flow distribution and the transmission network planning. The inverse Nataf transformation is adopted to build the wind speed correlation model. Combined with the probabilistic power flow based on the cumulant method and the chance constrained programming, an multi-objective optimization model including the wind speed correlation is built for the planning of power grid with wind farms, which comprehensively considers three indexes: economy, load balance and environmental effect. An improved NSGA-II algorithm is proposed to solve the model, which adopts the strategy of dynamic control parameter adjustment to enhance its global search performance. The entropy-based TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) is adopted to sort the optimal solution set for obtaining the final scheme. Case study for IEEE 24-bus system and a regional grid demonstrates the rationality of the proposed model and the effectiveness of the proposed method. Research results show that, the wind speed correlation has important influence on the objectives and the power grid planning scheme considering the wind speed correlation is more accurate.

**Key words:** wind power; cumulant method; uncertainty; multi-objective optimization; transmission network planning