

计及电网运行非均匀性的多目标输电网规划

潘智俊¹, 张 焰¹, 祝达康², 阮映琴²

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240; 2. 上海市电力公司, 上海 200122)

摘要: 电网运行非均匀性是电力系统的一项基本状态属性,反映了电网结构的合理性以及对电网运行安全可靠性的影响。在分析影响电网运行非均匀性因素的基础上,结合分层分区思想,以输电线路负载率的标准离差率为各区域运行非均匀性评价指标,同时考虑电网扩建成本和线路损耗,建立电网扩展规划的多目标优化模型。针对多目标量纲的不统一性,定义遗传择优因子,通过改进遗传算法实现多目标优化的折中求解策略。IEEE Garver 6 节点系统和华东某地区输电网规划算例分析表明,所提方法有效可行。

关键词: 电力系统; 输电; 规划; 电网运行非均匀性; 标准离差率; 遗传算法; 遗传择优因子; 优化

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.008

0 引言

随着城市化进程的不断深入,城市电网结构趋于庞大而复杂,在此过程中,电网建设往往与电源及负荷的分布、发展不对称,导致电网线路负载的非均匀性增加,电网安全可靠运行受到影响,同时也导致电力资产利用率较低。在进行电网规划与建设过程中,应该充分考虑运行非均匀性的影响,在兼顾供电可靠性和投资及运行经济性下,通过多目标优化方法尽可能使得构建或者扩展的电网均匀、可靠、高效^[1-2]。运行均匀性好的输电网在供电过程中将减轻原重载设备的负载压力,对提高潮流分布合理性和电网安全可靠性以及各设备利用率起到重要作用。

关于电网运行非均匀性,已有学者开展了研究。文献[3]针对给定的负荷需求模式,研究安全经济调度与电网输电均匀性调度间的关系,分析了不同调度方式对输电能力使用的影响规律。文献[4]指出,电网载流的不均匀性是系统瓶颈元件、关键元件和薄弱环节存在的原因,并以此作为电网关键元件及其单调性研究的基础。文献[5-6]利用复杂系统理论对小世界电网进行了拓扑建模,选取网络的连通性水平作为电网均匀性的评价指标,并以此为电网脆弱性评估判据。总体上看,国内外对于电网均匀性的研究较为零散,而且在电网规划方面未见有深入研究和应用。

本文首先阐述电网运行非均匀性概念和成因,以线路负载率的标准离差率作为电网运行非均匀性评价指标,在此基础上综合考虑扩建成本和运行损耗,建立计及网络运行非均匀性的电网扩展规划多目标优化模型。然后对遗传算法进行改进,定义遗传择优因子,实现多目标优化的折中求解策略。最后,通过算例分析说明本文研究工作的有效性。

1 电网运行非均匀性及其影响因素

1.1 电网运行非均匀性概念

均匀性是一个在日常生活中经常用到的概念,是与物质的一种或多种特性相关的具有相同结构或组成的状态。物质的这种均匀分布特性通常能够对事物发展起到积极作用。

电网运行非均匀性是输电网的一种固有属性,它反映了电源和负荷分布确定的状况下,当前电网结构中各输电设备分布及利用状态的差异。在建设费用和运行条件允许的情况下,运行均匀性好的电网在供电过程中可以减少重载或过载线路出现几率,增强供电可靠性,同时能更大程度地利用各输电设备容量,提高电网运行的经济性。

1.2 影响电网运行非均匀性的主要因素

输电网网络运行均匀程度主要受电源分布、负荷分布及可用的输电线路通道等影响。在实际运行中,虽然可以通过调节发电机出力等达到系统潮流最优分布,但这种调节有一定的局限性,往往受到不合理的电网结构布局影响,这是客观存在且无法避免的。

1.2.1 电源、负荷分布的非均匀性

电力系统电源及负荷大小和位置分布具有一定的刚性。负荷分布主要取决于人类生产与生活设施的地理位置分布,而电源位置分布则在较大程度上取决于一次能源的分布及对城市生活环境的影响,故主要集中在城郊或偏远地区。负荷量取决于当地的生产生活及经济发展水平,再由电网调度部门根据负荷预测的结果制定发电计划。在输电能力允许的情况下,一般不能随意调整电源出力和负荷需求大小。这就势必造成电源及负荷在空间和数量上的不均匀性分布,是导致电网运行不均匀的源头之一。

1.2.2 输电通道分布的非均匀性

由于地理及市政建设等影响因素,实际电网的建设受可用输电通道等多方面的约束,导致其拓扑结构具有不均匀性^[8]。此外,输电线路参数差异也会影

响电网运行的均匀性,即使是 2 条相同长度的线路,由于参数不同,实际的电气距离也有所差异。输电通道分布的非均匀性是造成电网中部分线路重载状况明显、薄弱环节突出的主要原因。尽管电力系统运行调度方式的多样性能缓和因上述分布不合理所带来的影响,但想真正改善,需从规划层面来考虑,通过合理改进网架结构将此类客观影响降到最小。

1.3 电网运行非均匀性的负面影响

电网结构的不合理反映在运行状态方面,会造成输电线路负载率分布不均匀,使得一些线路承担较大的输送容量,重载甚至满载运行,造成输电阻塞,而另一些线路则处于轻载状态,不能充分发挥其作用。线路负载率的过大差异,不仅会造成整个电网资产利用率的低下,更重要的是,重载线路势必成为整个电网安全运行的脆弱环节,这些线路一旦发生故障更有可能引起系统潮流的大范围转移,产生级联故障并最终造成大停电事故的发生。

电网运行非均匀性表征了电网结构的合理程度,是电网运行安全性和经济性的综合体现。在输电网扩展规划时,需考虑电网运行非均匀性带来的影响,通过优化规划使电网结构尽可能合理,改善电网薄弱环节,提高输电设备利用率和全网供电可靠性。

2 电网运行非均匀性评价指标

本文主要应用输电设备负载率的标准离差率来表征电网运行非均匀性:一是它能反映电网结构变化对电网运行造成的影响;二是它本身综合体现了电网运行安全性和经济性,负载率越均匀的电网,设备利用率和系统抗扰动性也越佳。

2.1 输电设备的负载率

输电设备负载率为每台设备(主要是变压器与线路)实际传送的有功功率与其本身最大传送有功功率限值的比值,即:

$$T_{ii}(X_i) = \frac{f_i}{f_{i,\max}} X_i \quad (1)$$

其中, f_i 为第 i 台输电设备实际传送的有功功率; $f_{i,\max}$ 为其本身最大传送有功功率限值。功率 f_i 流动的正方向取其实际的方向,因此, T_{ii} 最小值为 0,最大值为 1。

设 X_i 为待选设备决策量,对原网络中已存在的设备,其默认值为 1。

$$X_i = \begin{cases} 0 & \text{第 } i \text{ 台输电设备不存在} \\ 1 & \text{第 } i \text{ 台输电设备存在} \end{cases} \quad (2)$$

通常,输电线路和变压器分别用最大电流 I_{\max} 和视在功率 S_{\max} 来表征其传输功率的能力。式(1)中的 f_i 和 $f_{i,\max}$ 可根据不同输电设备种类、型号和限值要求进行设置。

2.2 非均匀性指标定义

根据式(1)可得到电网中每台输电设备的负载率,这些数值有高有低,分布有疏有密,需用一个统一的指标来描述它们的均匀程度(或者离散程度)。本文应用标准离差率 CV(Coefficient of Variance)这一综合指标来评价电网运行非均匀性。

标准离差率表示一组数据的标准差与期望值之比,是风险评估上的一个常用指标,以相对数来衡量待决策方案的风险,其计算方法如下。

给定一组 a 个负载率数据 $T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im}$,求得这组数据的平均值 E 。进而有:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{a-1} \sum_{i=1}^a (T_{in} - E)^2} \quad (3)$$

$$\delta_{CV}(T_{in}) = \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

其中, σ 为这组负载率数据的标准差; $\delta_{CV}(T_{in})$ 为负载率的标准离差率。这组数据的离散程度越高,其标准离差率越大^[9]。

从上述计算过程中可以看出,标准离差率是各种可能的数据 T_{in} 偏离期望 E 的综合差异,是反映随机变量离散程度的一个指标。而常用的标准差是一个绝对量,不是一个相对值,它只能用来比较期望值相同的情况下各组数据的离散程度,而不能用来比较期望值不同时各组数据的离散程度。

每种规划方案都有相对应的一组输电设备负载率数值,各组期望值都会不同,故相较于标准差而言,标准离差率更好地反映了不同方案下,各组输电设备负载率之间均匀程度(或离散程度)的变化情况。

2.3 考虑分层分区的指标计算

考虑到潮流输送线路在不同的电压等级和不同的地理区域负荷下,其发挥的作用以及相应负载率水平势必差距不小,以全网统一标准来考虑电网运行均匀性并不合理,故本文结合电压等级划分和网络地理特征对电网先分层后分区,逐个统计对比各区域标准离差率数据,进而得到合理表征电网运行非均匀性的综合指标。具体步骤如下。

a. 分层:根据电网中多个电压等级进行划分,一般主要考虑 500 kV 和 220 kV 这 2 个层次的电网架构,可得相应线路运行非均匀性标准离差率 δ_{CV500} 和 δ_{CV220} 以及变压器运行非均匀性标准离差率 $\delta_{CVT500/220}$ 。

b. 分区:在层次分明的基础上,对同一层级按照地域就近原则划分区域。一般统计全网 500/220 kV 变电站个数作为各分层区域划分个数,并对周围母线节点依此进行编号统计。

c. 线路选取:考虑到区内输电线路和区间联络线所起作用不同,其负载水平也不相统一,而本文区域划分的意义更多体现在各区域内部资产是否分配

合理及运行是否安全可靠。故在此只考虑各区域内输电线路的运行非均匀性,各区间联络线不在计算范围内。处理方法:筛选出连接相同区域编号节点的输电线路,计算其负载率以考核区域运行非均匀性。

综上,可得全网综合运行非均匀性指标 $\delta_{CVtotal}(T_r)$:

$$\delta_{CVtotal}(T_r) = \frac{\delta_{CV500} + \delta_{CV220} + \delta_{CVT500/220}}{3} = \frac{\left[\sum_{k=1}^m \sum_{i \in L_{500}} \delta_{CV_i}(T_{ri}) + \sum_{k=1}^m \sum_{j \in L_{220}} \delta_{CV_j}(T_{rj}) + \sum_{k=1}^m \sum_{l \in T_{500/220}} \delta_{CV_l}(T_{rl}) \right]}{3m} \quad (5)$$

其中, m 为总划分区城数; L_{500} 、 L_{220} 、 $T_{500/220}$ 分别为 500 kV 线路、220 kV 线路以及 500/220 kV 变压器集合。

3 计及运行非均匀性的输电网规划模型

本文以电网建设投资成本 C 、线路损耗成本 P_{loss} 和电网运行非均匀性指标 $\delta_{CVtotal}(T_r)$ 为规划方案优化的目标函数,考虑各新建线路的整数性约束和保证电网正常运行约束。输电网扩展规划模型可描述为:

$$F(X) = \min [f_1(C), f_2(P_{loss}), \delta_{CVtotal}(T_r)] \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \Delta P_i^N = P_{Gi}^N - P_{Li} - P_i^N(X) = 0 \quad (7)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi}^N \leq P_{Gi,\max} \quad (8)$$

$$P_{j,\min} \leq P_{j,l}^N \leq P_{j,\max} \quad (9)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i^N \leq U_{i,\max} \quad (10)$$

$$\Delta P_{i,l}^{N-1} = P_{Gi,l}^{N-1} - P_{Li} - P_{i,l}^{N-1}(X) = 0 \quad (11)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi,l}^{N-1} \leq P_{Gi,\max} \quad (12)$$

$$P_{j,\min} \leq P_{j,l}^{N-1} \leq P_{j,\max} \quad (13)$$

$$U_{i,\min} \leq U_{i,l}^{N-1} \leq U_{i,\max} \quad (14)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$X_k = 1 \quad \forall k \in E \setminus E^+ \quad (16)$$

$$X_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in E \quad (17)$$

式(6)为目标函数,分别表示电网投资成本、线路损耗成本以及运行非均匀性指标最小;式(7)—(10)分别表示 N 运行条件下,系统潮流约束方程、发电机出力约束、输电设备容量约束以及节点电压约束;式(11)—(14)则表示 $N-1$ 运行条件下(断开任意线路 l)系统潮流约束方程、发电机出力约束、输电设备容量约束以及节点电压约束;式(16)表示已建输电设备默认决策变量为 1,其中 E 为所有输电设备的集合(包括了待建和已建的), E^+ 为待选新建输电设备集合, $E \setminus E^+$ 为已建输电设备集合;式(17)表示决策变量的整数性约束。

$$F(C) = \sum_{k \in E^+} c_k X_k \quad (18)$$

其中, c_k 为建设第 k 台输电设备所需的投资成本; k 为输电设备号。

$$f(P_{loss}) = \sum_{i=1}^n U_i \sum_{j \in h} U_j X_c (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (19)$$

其中, G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳

和电压相角差; n 为节点总数; h 为与节点 i 相连的节点集合; e 为线路 ij 对应的输电设备序号。

电网运行均匀性佳和线路损耗小两者具有一定的相关性,但不可混为一谈。在规划选线过程中,建设过多冗余线路而形成完全均匀网络同样会降低电网运行非均匀性,这样的网络并不实用,此时目标函数中建设费用和线路均匀性指标相左,而多余线路增加了线路损耗使得总效益下降,以达到规避此类方案的目的。采用线路损耗配合另 2 个指标,可以起到平衡效益的作用,从而筛选出改善运行状况最佳,又最为合理的待建输电设备。故选择线路损耗作为目标函数之一与电网运行非均匀性指标并不重复。

4 基于改进遗传算法的模型求解

4.1 多目标函数的处理

多目标优化问题的特点是目标间的不可公度性和矛盾性。不可公度性指各目标没有统一的度量标准,难以比较;目标间的矛盾性则是指如果采用某种方案去改善某目标,可能会使另一目标的值变好或变坏。

目前对多目标函数处理的方法主要是用权重系数法^[12-14],把多目标优化转化为单目标优化问题来处理。但在很多情况下,由于对问题本身缺乏先验知识,对某些子目标的偏好及其偏好程度是个模糊概念,因此很难准确给出偏好因子(权重)的值。在所提目标函数中,投资成本量纲为万元;网络有功损耗量纲为 MW;运行非均匀性是一个相对指标,无量纲。这 3 个目标不能简单地用权重系数法归并为单一目标求解,本文采用改进的遗传算法来解决该问题。

4.2 遗传算法的改进及应用

应用传统遗传算法^[15-16]求解同一基因个体对不同环境(即多目标)的适应度会有高有低,如何评价这些基因个体的优劣是求解多目标函数最优解的关键。本文对适应度求解方法进行改进,提出综合运用局部遗传择优因子和全局遗传择优因子来评定解的优劣程度。

局部遗传择优因子是基因个体针对某一特定环境的适应程度,即一个可行解对某一个具体待优化函数最优解的逼近程度。全局遗传择优因子则是基因个体对综合环境的适应程度,即一个可行解对所有优化的目标函数最优解的逼近程度。

多目标函数 $\min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_b(x)]^T$ (b 为总目标数量)求解过程中,任意一组基因个体 x_i 对于单一目标 $f_j(x)$ 的局部遗传择优因子 $G_{jf}(x_i)$ 为:

$$G_{jf}(x_i) = \sum_{c=1}^d G(x_c) \quad (20)$$

$$G(x_c) = \begin{cases} 1 & f_j(x_i) \leq f_j(x_c) \\ 0 & f_j(x_i) > f_j(x_c) \end{cases} \quad (21)$$

其中, $c=1, 2, \dots, d$; d 为一次循环下所有产生的待选基因数量; j 表征当前计算的单一目标。局部择优因子越大的可行解相对于因子越小的可行解更加接近单一目标的最优解。

全局遗传择优因子的计算如下式所示:

$$G_F(x_i) = \sum_{j=1}^b G_{F_j}(x_i) \quad (22)$$

全局遗传择优因子是将基因个体 x_i 对各目标的局部择优因子相加得到的, 代表了该可行解在多目标最优要求下的优劣程度。全局遗传择优因子越大的基因所表征的网络就越接近多目标函数的最优解。

运用遗传择优因子对解的评价, 可以简单理解为是对解进行评分。假设在求多目标函数的最小值时存在一组解, 对各目标函数它们都有对应的函数值(彼此量纲可以不同)。对同一目标函数, 按照解对应函数值的大小对各个解进行评分(局部遗传择优因子): 若某个解的函数值最小, 则得分为满分, 数值上等于这组解(或者基因)的总个数; 一组中比它函数值略大的得分减 1, 依此类推, 函数值最大的得分最少。

假设现有 3 个目标函数, 并且一代种群随机产生了 50 个基因个体, 其中 4 个解对于各目标的得分(局部遗传择优因子)如下: $x_1(45, 45, 45)$, $x_2(50, 35, 42)$, $x_3(40, 50, 41)$, $x_4(30, 30, 30)$ 。为评出优劣, 将它们各自的分数相加(全局遗传择优因子), 总分为: $x_1(135)$, $x_2(127)$, $x_3(131)$, $x_4(90)$ 。选总分最高的 x_1 为最优解, 认为其能较好地满足各目标的要求。以牺牲单一子目标的最优化, 而达到目标函数的综合最优, 同时不存在偏离过大的现象, 防止了部分极端高分而其余表现很差的方案入选, 这也是均匀性的一种体现。

在利用整体遗传择优因子和局部遗传择优因子来评价多目标函数解的过程中, 避免了不同量纲之间的矛盾, 也无需利用权重系数将多目标函数变成单目标函数来处理, 消除了对权重的依赖。

此外, 在具体操作中, 将上代中全局遗传择优因子最优的个体作为保留基因个体, 直接克隆进入下代, 以确保全局最优性不会在基因交换和变异过程中退化或丢失。通过设置全局遗传择优因子重复次数阈值来优化算法收敛速度。

输电网扩展规划流程如图 1 所示。

5 算例分析

5.1 IEEE Garver 6 节点系统算例

首先以 IEEE Garver 6 节点测试系统作为算例, 分析验证本文提出的计及电网运行非均匀性的多目标输电网规划方法。该系统的网络拓扑结构如图 2

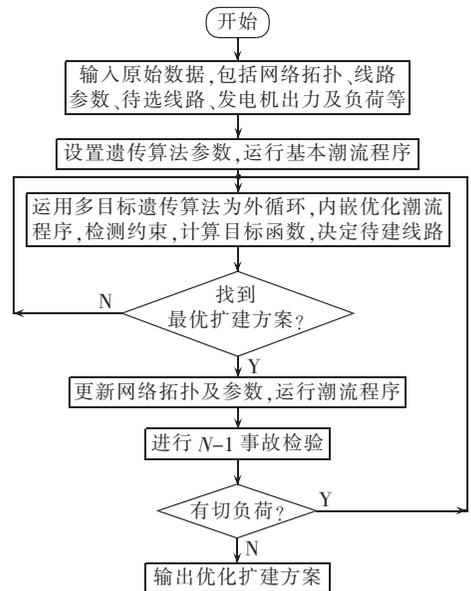


图 1 输电网扩展规划流程图

Fig.1 Flowchart of expansion planning for transmission network

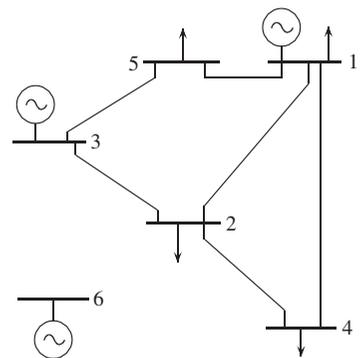


图 2 Garver 6 节点系统结构

Fig.2 Structure of Garver 6-bus system

所示, 详细系统参数见文献[18]。

在该算例中, 假设任意两节点间的输电走廊都允许架设线路, 架设线路回路数限制在 3 回(包括已建线路), 网络已建线路 6 条, 待选线路 39 条。设线路投资费用为 25 万元/km, 每条线路的故障率都为 0.01。算法中的其他参数设置如下: 遗传交叉率为 0.9, 遗传变异率为 0.04, 初始种群大小为 20, 最大遗传代数为 20, 全局遗传择优因子重复次数为 15。Garver 6 中各电源及负荷增长方案如表 1 所示。

表 1 Garver 6 节点系统电源及负荷增长方案
Tab.1 Power supply and load growth scheme of Garver 6-bus system

节点	电源功率/MW		负荷功率/MW	
	扩建前	扩建后	扩建前	扩建后
1	150	150	20	80
2	0	0	60	240
3	120	360	10	40
4	0	0	40	160
5	0	0	60	240
6	—	600	—	0

分别运用改进的遗传算法求解仅考虑建设成本最低为目标的规划方案(方案 1)和计及电网运行非均匀性的多目标规划方案(方案 2),结果见表 2。

表 2 Garver 6 节点系统扩展规划方案

Tab.2 Expansion planning scheme of Garver 6-bus system

参数	方案 1	方案 2
待建线路(回数)	1-3(1),2-5(1), 2-6(2),3-5(1), 4-6(2),1-2(1), 1-6(2),2-4(1), 3-4(1)	1-3(1),2-5(1), 2-6(2),3-5(1), 4-6(2),1-5(1), 1-6(1),2-3(1), 3-4(2),5-6(1)
C/万元	12100	12400
P_{loss}/MW	37.254	28.287
$\delta_{CVtotal}(T_r)/\%$	59.9007	47.4283
N-2 条件下电量不足期望值/MW	0.0013	0

由表 2 结果可见,方案 1 虽然比方案 2 节约了线路建设费,但其对应的网络无论是在系统损耗还是运行非均匀性上都比方案 2 差。在供电可靠性方面,方案 1、2 在形成时都通过了 N-1 可靠性校验,进一步,对两方案进行 N-2 可靠性后校验,发现方案 1 存在切负荷现象,方案 2 则没有。方案 2 的网络通过降低运行损耗可逐步补偿建设成本,其更为均匀的负载率情况改善了输电设备的利用率,同时降低了原有重载设备发生故障的可能性。通过以上分析可知,方案 2 以牺牲一部分建造成本来达成整体目标的最优,兼顾运行的经济性和系统的均匀性,这样的网络是更为经济而可靠的。

5.2 华东某地区输电网算例

以华东某地区 2010 年实际夏季运行网络(平均负荷状态)作为基础网络,运用本文所提的规划模型及算法求解 2015 年的扩展规划方案(本文方案),与仅考虑建造成本最优的 2015 年的规划网(原方案)进行比较,结果如表 3、4 所示。

表 3 某地区 2010/2015 输电网扩展基本信息
Tab.3 Basic information of a regional 2010/2015 expansion planning

年份	500 kV 节点数量	220 kV 节点数量	总负荷/MW
2010	21	220	25275.1
2015	27	423	30862.7

表 4 2015 年规划方案比较

Tab.4 Comparison of 2015' planning schemes

参数	原方案	本文方案
新建支路数	290	296
C/亿元	37.404	38.238
P_{loss}/MW	126.930	124.679
运行损耗/%	0.411	0.404
$\delta_{CVtotal}(T_r)/\%$	63.61	61.24

表 3、4 结果表明,本文方案比原方案新添加了部分线路,投资增加了 0.834 亿元,但是运行损耗稍有降低,且电网运行非均匀性有了一定的改善。

本文方案是在平均负荷运行状态下求得的。考虑到不同运行状况对输电设备负载率的影响,选取负荷比例系数 K 模拟 60%~120%(60%对应最小负荷,120%对应最大负荷)平均负荷状况,计算本文方案对应的系统损耗和运行非均匀性指标,并与原方案对比分析,见表 5。

表 5 不同 K 值对应的系统运行损耗和运行非均匀指标

Tab.5 Loss and heterogeneity index of system operation for different K values

K/%	运行损耗/%		$\delta_{CVtotal}(T_r)/\%$	
	原方案	本文方案	原方案	本文方案
60	0.314	0.308	69.61	66.92
70	0.347	0.339	66.94	64.57
80	0.375	0.365	64.74	62.08
90	0.398	0.390	61.88	60.03
100	0.411	0.404	63.61	61.24
110	0.423	0.410	62.30	60.89
120	0.432	0.417	67.13	64.84

由表 5 可见,随着 K 值的不断增加,两方案的线路损耗率随之上升,呈现一致性,与此同时,本文方案的线路损耗率始终在原方案之下,且 K 值越大,线路损耗降低越明显。两方案的运行非均匀性指标 $\delta_{CVtotal}(T_r)$ 在不同 K 值下不具有趋势性,但本文方案的 $\delta_{CVtotal}(T_r)$ 值始终优于原方案。

综上可知,相较于原方案,本文方案在不同负荷水平下运行,呈现出更小的线路损耗率和更优的运行非均匀性指标,说明本文方案具有普适性,且更为经济、可靠。

6 结论

本文在分析影响输电网运行非均匀性因素的基础上,以线路负载率的标准离差率作为电网运行非均匀性评价指标,兼顾电网扩建成本和线路损耗,建立了电网扩展规划的多目标优化模型。针对不同量纲下的最优化问题,通过改进的遗传算法进行求解。算例分析表明,本文所提方法和模型有效可行,且具有较强适应性,对输电网的扩展规划具有参考意义。

参考文献:

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社,1990.
- [2] 牛辉,程浩忠,张焰,等. 电网扩展规划的可靠性和经济性研究综述[J]. 电力系统自动化,2000,24(1):51-56.
NIU Hui, CHENG Haozhong, ZHANG Yan, et al. Review of reliability and economy problems in transmission expansion planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 51-56.
- [3] 梁才,刘文颖,温志伟,等. 电网组织结构对其自组织临界性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):6-11.
LIANG Cai, LIU Wenying, WEN Zhiwei, et al. The influences of power grid structure on self-organized criticality [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 6-11.
- [4] 常康,韩学山,王孟夏,等. 电网关键元件及其单调性研究 I:概念

- 与基础[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6):1-5.
- CHANG Kang, HAN Xueshan, WANG Mengxia, et al. Study on the crucial element and its monotone in power grid part I: concepts and foundation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6):1-5.
- [5] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8):7-10.
- DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8):7-10.
- [6] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10):20-25.
- DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10):20-25.
- [7] 何大钊, 刘宗华. 复杂系统与复杂网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [8] 张强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2):84-89.
- ZHANG Qiang, HAN Xueshan, XU Jianzheng. Analysis of security economic dispatch and homogeneous dispatch[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(2):84-89.
- [9] 刘青. 衡量筹资风险程度的数学模型[J]. 辽宁师范大学学报, 1998, 21(1):24-28.
- LIU Qing. A mathematic model for judging the degree of fundraising risks[J]. Journal of Liaoning Normal University, 1998, 21(1):24-28.
- [10] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [11] NATALIA A, ALEXIS L M, ANTONIO J C. Transmission expansion planning: a mixed-integer LP approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3):1070-1077.
- [12] 颜伟, 孙渝江, 罗春雷, 等. 基于专家经验的进化规划方法及其在无功优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7):76-80.
- YAN Wei, SUN Yujiang, LUO Chunlei, et al. EP based on specialist experiences and its application to var optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7):76-80.
- [13] 张宁. 配电网多目标经济性优化模型和算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8):48-53.
- ZHANG Ning. Optimal multi-objective economic model and algorithm for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8):48-53.
- [14] 梁钟辉. 基于多目标理论的输电网络规划应用方法及北通道输电规划研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- LIANG Zhonghui. Study of transmission network planning based on multi-objective theory and the planning of north-channel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [15] RUBÉN R, MARCOS J R. A metaheuristic to solve the transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4):2289-2291.
- [16] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [17] 范宏, 程浩忠, 唐永红, 等. 相关机会二层规划法在输电网扩展规划中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11):59-63.
- FAN Hong, CHENG Haozhong, TANG Yonghong, et al. Application of dependent-chance bilevel programming in transmission network expansion planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):59-63.
- [18] Garver-6 节点系统规划原始资料[EB/OL]. [2011-04-17]. <http://www.docin.com/p-185238856.html>.
- [19] ZHANG Hui, VITTAL V. A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):1125-1133.
- [20] 程浩忠, 张焰. 电力系统规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

作者简介:



潘智俊

潘智俊(1988-),男,浙江宁波人,博士研究生,研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性(E-mail:panzhijun34@163.com);

张焰(1958-),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划、电力系统可靠性、配电系统自动化等。

Multi-objective transmission network planning considering grid-operational heterogeneity

PAN Zhijun¹, ZHANG Yan¹, ZHU Dakang², RUAN Yingqin²

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The heterogeneity of grid operation is a basic state attribute of power system, which reflects the rationality of grid structure and the impact on the safety and reliability of grid operation. The influencing factors of grid operational heterogeneity are analyzed and a multi-objective optimization model is built for the hierarchical and partitioned expansion planning of power transmission network, which takes the CV (Coefficient of Variance) of transmission line load rate as the evaluation index of region-operational heterogeneity and considers the expansion cost and transmission line loss. Aiming at the dimensional disunity of multiple objectives, a genetic merit factor is defined and the genetic algorithm is improved to obtain the compromise solution of the proposed model. The case analysis for IEEE Garver 6-bus system and a regional transmission network planning verifies the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: electric power systems; electric power transmission; planning; grid-operational heterogeneity; coefficient of variance; genetic algorithms; genetic merit factor; optimization