

计及能效电厂优化配置的输电系统两层规划

郑 静¹,文福拴¹,李 力²,王 珂²,高 超²

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 广东省电力调度中心,广东 广州 510600)

摘要:提出能效电厂优化配置原则。以两层规划理论为基础建立计及能效电厂优化配置的输电系统两层规划模型,上层模型以输电系统投资和能效电厂投资的总成本最小为目标,下层模型以能效电厂投资成本最小为目标,上下层之间存在交互作用,最终由上层决策获得输电系统规划方案。采用遗传算法和原对偶内点法相结合的混合算法对所建的输电系统规划模型进行求解。18 节点和 46 节点系统算例结果证明了所提模型和算法的可行性与有效性。

关键词:输电系统;能效电厂;规划;遗传算法;原对偶内点法;模型

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.003

0 引言

随着经济社会的快速发展,我国部分区域长期面临缺电窘境,而且负荷峰谷差有逐步增大的趋势。如果单纯依靠增加机组容量来满足日益增长的用电需求,则可能导致峰荷机组运行效率低下、一次能源消耗过大以及环境污染严重等系列问题。为了我国经济社会的可持续健康发展,在国务院发布的《“十二五”节能减排综合性工作方案》中明确指出要控制能源消耗总量与主要污染物排放总量,并提出要加强电力需求侧管理,推广能效电厂 EPP(Efficiency Power Plants)。

能效电厂属于电力需求侧管理领域的一种创新模式。在能效电厂中,通过提高用电设备的能效来实现电力和电量的节约,同时保护或改善环境。这不仅有利于缓解当前电力供应紧张局面,而且对节能减排也有重要作用。能效电厂已经在多个国家和地区得到了成功实施,在减少电力建设投资、改善电力系统运行的经济性和可靠性、减少电力用户电费开支、降低能源消耗、改善环境质量等方面取得了较好成效^[1]。目前,我国的能效电厂建设正处于探索和试点阶段,江苏、广东和上海等地已开展了相关试点工作,还有部分省市则正在积极探索能效电厂建设方案^[2]。有关能效电厂对电力系统规划、运行等方面影响的研究近年来逐渐受到关注。文献[3]提出了能效电厂参与电力系统随机生产模拟的处理方法,用等效电量函数法分析了能效电厂对电力规划和运行的影响。文献[4]在综合资源规划中引入能效电厂,

将能效电厂与供应侧资源同等纳入电源规划模型中,使规划方案具有更好的经济和环境效益。国家电网能源研究院完成的《能效电厂建设途径和方法研究》报告指出 2020 年能效电厂占总装机容量的比例有望达到 8%。随着能效电厂在电力系统中所占比例的逐步增长,在输电系统规划中也需适当计及其影响,目前国内外尚没有这方面的研究报道。

在此背景下,本文首先提出了能效电厂的优化配置原则,并把能效电厂的优化配置纳入到输电系统规划之中。通过对能效电厂的优化配置,可以降低负荷需求,优化系统潮流分布,从而减少系统的投资成本、资源消耗和污染物排放,提高系统的经济效益和环境效益。然后,以输电系统和能效电厂投资总成本最小为目标,建立了输电系统两层规划模型,并采用遗传算法和原对偶内点法相结合的混合算法对所建模型进行求解,分析能效电厂对输电系统规划的影响。

1 能效电厂分类及优化配置原则

能效电厂是一种虚拟电厂,主要通过一系列的节电措施,降低用电负荷,提高能源利用效率,将减少的负荷需求视同“虚拟电厂”提供的电力电量,最终实现节能减排。能效电厂在满足电力负荷需求和系统电力电量平衡方面与常规电厂有着相同的作用,并具有建设周期短、成本低(单位建设成本为常规电厂的 1/3 左右)、节能环保以及易于推广等特点^[2-6]。

构成能效电厂的节电措施多种多样,它们可以单独构成某类能效电厂,也可打包组合成一个综合能效电厂。本文按照终端用电设备类型将能效电厂分为 6 个主要类别^[5]:工业电机(EPP1);绿色照明和家用电器(EPP2);商业新建筑(EPP3);民用和商业制冷采暖(EPP4);变压器(EPP5);可中断负荷(EPP6)。详见表 1。

收稿日期:2012-04-06;修回日期:2013-04-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA05A105);广东电网公司重点科研项目

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A105) and the Key Project from Guangdong Electric Power Corporation

表 1 能效电厂的分类
Tab.1 Classifications of EPP

EPP 类别	措施
工业电机(EPP1)	鼓励工业企业采用高效电机、高效风机水泵、变频传动装置及其他先进控制技术等
绿色照明和家用电器(EPP2)	促进购买紧凑型荧光灯和高效家用电器
商业新建筑(EPP3)	执行节能标准,采用节能型技术、设备和材料,加强建筑物用能系统的运行管理,提高建筑物的能源利用率
民用和商业制冷采暖(EPP4)	提供现金激励或采用其他融资策略鼓励用户购买高效空调设备
变压器(EPP5)	在工业和大型商业企业新购买或自然更换变压器时,推广节能变压器和鼓励更新或改造高耗能变压器
可中断负荷(EPP6)	利用经济激励机制,在负荷高峰期或系统处于紧急状态时,用户按照合同规定中断或者削减负荷

根据国外经验并结合我国的具体情况,能效电厂的资金来源主要有财政拨款、节能公益基金以及第三方投资等方式^[2]。与常规电源的建设相比,这些资金来源非常有限。为了使有限资金产生最大效益,就需要对能效电厂进行优化配置。能效电厂的优化配置就是确定在何处投建何种类型、多大容量的能效电厂。主要需要考虑以下 2 个原则:

a. 优先配置单位投资成本低的能效电厂,增加能效电厂容量,减少一次能源消耗和污染物排放;

b. 优先配置能够有效缓解输电系统阻塞的能效电厂,降低输电线路投资成本。

在实际应用中,需要综合考虑以上优化配置原则,以最大化综合成本效益。

2 计及能效电厂优化配置的输电系统两层规划模型

本文将能效电厂引入输电系统规划中,通过对能效电厂优化配置降低输电线路投资成本,同时减少资源消耗和污染物排放量。基于两层规划理论^[8],将能效电厂的优化配置和输电系统优化规划结合起来,进行分层规划。上层模型以新增候选线路为变量,采用输电系统和能效电厂投资总成本最小为优化目标,将输电线路候选方案传递给下层。下层模型则以能效电厂投资成本最小为目标进行优化,得到能效电厂的优化配置结果,并将目标值返回给上层模型。上层模型再次进行优化规划,如此反复交替进行,实现上下层的交互作用,确保上下层规划都能满足有关约束要求,最终由上层决策模型获得最终优化方案。

2.1 上层规划模型

以总投资成本(包括输电线路投资成本和能效电厂投资成本)最小为目标:

$$\min F = \sum_{i \in N_l} C_{Li} Z_i + f \quad (1)$$

约束条件为:

$$0 < Z_i \leq \bar{Z}_i \quad (2)$$

其中, f 为下层模型的目标值; N_B 为系统线路集合; C_{Li} 为候选线路 i 的造价(万元); Z_i 和 $\bar{Z}_i$ 分别为第 i 条支路的新增候选线路条数和最大允许新增线路条数。

2.2 下层规划模型

以能效电厂投资成本为目标:

$$\min f = \sum_{j \in N_E} C_{Ej} p_{Ej} \quad (3)$$

约束条件包括基态和 $N-1$ 运行状态下的线路潮流、发电机出力、能效电厂容量以及能效电厂的投资总额、耗煤总量和 SO_2 排放总量的约束等,即:

$$B\theta = P_G - P_L + P_E \quad (4)$$

$$p_l \leq p_l \leq \bar{p}_l \quad l \in N_B \quad (5)$$

$$p_l \leq p_{lh} \leq \bar{p}_l \quad l \in N_B, h \in N_B \text{ 且 } h \neq l \quad (6)$$

$$p_{Gk} \leq p_{Gk} \leq \bar{p}_{Gk} \quad k \in N_G \quad (7)$$

$$0 \leq p_{Ej} \leq \bar{p}_{Ej} \quad j \in N_E \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N_E} C_{Ej} p_{Ej} \leq \bar{C}_E \quad (9)$$

$$\sum_{k \in N_G} \beta_k p_{Gk} T_k \leq \bar{A}_c \quad (10)$$

$$\sum_{k \in N_G} \beta_k p_{Gk} T_k U_{SO_2k} \leq \bar{A}_s \quad (11)$$

其中, N_E 为能效电厂集合; C_{Ej} 为能效电厂 j 的单位建设成本(万元/MW); p_{Ej} 为能效电厂 j 的容量(MW); N_G 为常规电厂集合; β_k 为常规电厂 k 的平均发电煤耗(g/(kW·h)); p_{Gk} 为常规电厂 k 的发电出力(MW); T_k 为常规电厂 k 的年发电利用小时数(h); U_{SO_2k} 为常规电厂 k 的煤炭的 SO_2 排放率; B 为系统导纳矩阵; θ 为节点电压相角向量; P_G 、 P_L 分别为发电出力和负荷功率向量(MW); P_E 为能效电厂功率向量(MW); p_l 为线路 l 的有功功率, p_{lh} 为线路 h 故障停运情况下线路 l 的有功功率, $\bar{p}_l$ 和 $\underline{p}_l$ 分别为线路 l 有功功率的上、下限值(MW); $\bar{p}_{Gk}$ 和 $\underline{p}_{Gk}$ 分别为常规电厂 k 发电出力的上、下限值(MW); $\bar{p}_{Ej}$ 为能效电厂 j 的容量上限值(MW); $\bar{C}_E$ 为所有能效电厂的总投资上限(万元); $\bar{A}_c$ 和 $\bar{A}_s$ 分别为研究区域内的发电耗煤总量上限(t)和发电 SO_2 排放总量上限(t)。

U_{SO_2k} 可由物料平衡法进行计算^[9]:

$$U_{SO_2k} = 2\eta\alpha_k(1-\lambda_k) \quad (12)$$

其中, η 为煤炭中所含硫在燃烧后转化成 SO_2 的比例,在目前的环境统计中 η 值一般取 0.8; α_k 和 λ_k 分别为常规电厂 k 的煤炭硫份含量和综合脱硫效率。

3 求解方法

计及能效电厂优化配置的输电系统两层规划模型在数学上是一个混合整数规划问题,这里采用基

于遗传算法和原对偶内点法的混合算法进行求解。利用遗传算法处理上层决策中的整数变量,对下层规划则采用原对偶内点法快速寻优,这样可以充分发挥2种算法的优点,取得较快的计算速度。

3.1 采用遗传算法求解上层模型

遗传算法^[10-11]隶属于现代启发式优化方法,能够在全局意义上给出若干个优化方案,适于求解整数优化问题。在本文中染色体采用整数编码方式,选择操作采用竞赛法,并将总投资成本作为适应度函数评价方案的优劣。交叉操作采用2点交叉,交叉概率取0.5。变异采用多点均匀变异方式,变异概率取0.08。在进化开始时就保留最好的个体,如果在新种群中又发现更好的个体,则用它代替前面保留的最优个体,在进化完成之后,保留下来的最优个体就可看作问题的优化解。

3.2 应用原对偶内点法求解下层模型

基于扰动 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件的原对偶内点法^[12-14]以其收敛速度快、鲁棒性强、对初值选择不敏感等优点,适用于求解大规模连续优化问题。

所构造的下层规划的数学模型可概括为:

$$\begin{cases} \min & f(x) \\ \text{s.t.} & g(x)=0 \\ & \underline{h} \leq h(x) \leq \bar{h} \\ & \underline{x} \leq x \leq \bar{x} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $f(x)$ 为目标函数; $g(x)$ 为等式函数约束, 是 m 维列向量; $h(x)$ 为不等式函数约束, 是 l 维列向量, $\bar{h}$ 和 $\underline{h}$ 分别为其最大和最小限值列向量; x 为状态变量, 是 n 维列向量, $\bar{x}$ 和 $\underline{x}$ 分别为其最大和最小限值列向量。

在式(13)中加入松弛变量将不等式约束转化为等式表达式, 并建立如下拉格朗日函数:

$$\begin{aligned} \min L = & f(x) + \lambda^T g(x) + u^T(h(x) + s_u - \bar{h}) + \\ & v^T(x + r_u - \bar{x}) + y^T(h(x) - s_d - \underline{h}) + z^T(x - r_d - \underline{x}) - \\ & \mu \left(\sum_{i=1}^l \ln s_{ui} + \sum_{i=1}^l \ln s_{di} + \sum_{i=1}^n \ln r_{ui} + \sum_{i=1}^n \ln r_{di} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

其中, s_u 和 s_d 分别为函数型不等式上、下限的松弛变量, 均为 l 维列向量; r_u 和 r_d 分别为变量型不等式上、下限的松弛变量, 均为 n 维列向量; λ, u, v, y, z 均为拉格朗日乘子构成的向量; μ 为障碍参数。

障碍参数可由对偶间隙计算得到^[13]:

$$\mu = \sigma C_{\text{gap}} / (2r) \quad (15)$$

其中, C_{gap} 为对偶间隙; σ 为中心参数; r 为不等式约束的数目。

对式(14)中的各变量求一阶偏导, 可得到最优条件, 再用牛顿法求解, 得到 KKT 条件^[12]如下:

$$\begin{bmatrix} \hat{H}(\cdot) & J^T(x) \\ J(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{G}(x) \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $\hat{H}(\cdot) = H(x, \lambda, u, y) + H_d$, H_d 为壁垒矩阵, 用于防止不等式约束的变量和函数越限, $H(x, \lambda, u, y)$ 为 Hessian 矩阵, 且 $H(x, \lambda, u, y) = \nabla^2 f(x) + \nabla^2 g(x) + \nabla^2 h(x)(u+y)$; J 为等式约束雅可比矩阵; $\hat{G}(x) = f_x + B^T(x) [[s_u]^{-1}([u]f_u - f_{s_u}) - [s_d]^{-1}([y]f_y + f_{s_d})] + [r_u]^{-1} \times ([v]f_v - f_{r_u}) - [r_d]^{-1}([z]f_z + f_{r_d})$, $[s_u], [s_d], [r_u], [r_d], [u], [y], [v], [z]$ 分别为由列向量 $s_u, s_d, r_u, r_d, u, y, v, z$ 的元素构成的对角元矩阵; $f_x, f_u, f_{s_u}, f_y, f_{s_d}, f_v, f_{r_u}, f_z, f_{r_d}$ 分别为函数 f 对 $x, u, s_u, y, s_d, v, r_u, z, r_d$ 求偏导所得的列向量。

在每一步迭代求解过程中都要计算原始变量和对偶变量的步长, 并对原始变量和对偶变量进行修正, 以保证收敛速度与解的最优性。

3.3 输电网规划模型求解流程

采用基于遗传算法和原对偶内点法的混合算法求解本文的两层规划模型, 主要步骤如下。

a. 输入原始数据和遗传算法相关参数。

b. 通过竞赛法产生 M 个染色体 $w_1, w_2, \dots, w_M$ 。

c. 对每一个候选规划方案 $w_i (i=1, 2, \dots, M)$, 利用原对偶内点法求出该方案所对应的能效电厂最优配置结果, 并利用式(3)计算得到 f 值。

d. 将 f 值反馈给上层优化问题, 求出总投资成本 F 。

e. 对每个染色体计算其适应度函数值, 并找出适应度函数值最小的方案, 即当前的最优解。将该最优的个体保留, 如果在下一次迭代过程又发现更好的个体, 则用它代替前面保留的最优个体。

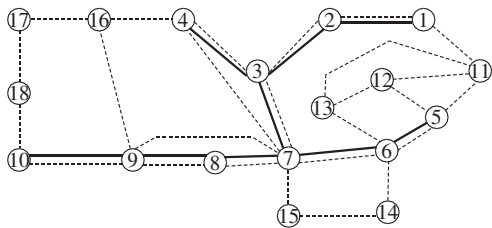
f. 如果连续 10 次迭代得到的最优个体都相同, 则结束迭代并取其作为最优输电系统规划方案; 否则, 对染色体进行选择、交叉和变异操作, 生成下一代群体, 之后转步骤 c。

4 算例分析

下面用 18 节点系统^[15]和 46 节点系统^[16]来说明所提出的输电系统两层规划模型与方法的可行性与有效性。假定这 2 个算例中所涉及的常规电厂均为火电厂, 年度发电利用小时数为 5500 h, 煤炭的硫份含量为 0.8%; 能效电厂建设资金来源于节能公益基金, 以电费附加资金的方式向用户收取。在规划时, 考虑基态和 $N-1$ 运行状态。

4.1 18 节点系统

该系统现有 10 个节点、9 条线路, 如图 1 所示。在未来某规划水平年, 系统增加为 18 个节点, 其中 7 个节点上有电源、17 个节点上有负荷, 总负荷为 35870 MW。发电机出力 and 负荷功率见表 2; 所有支路(包括现有线路和候选新增线路)的数据见表 3, 表中电抗为标么值, 后同, 每条支路最多可扩建 3 条



—— 已有线路,----- 可扩展路径

图 1 18 节点系统图

Fig.1 18-bus system

表 2 18 节点系统节点参数

Tab.2 Bus data of 18-bus system

节点号	发电机功率/MW	负荷功率/MW	节点号	发电机功率/MW	负荷功率/MW
1	0	550	10	7500	940
2	3600	840	11	5400	7000
3	0	1540	12	0	1900
4	0	380	13	0	1100
5	7600	6390	14	5400	320
6	0	1990	15	0	2000
7	0	2130	16	4950	1320
8	0	880	17	0	4000
9	0	2590	18	1420	0

线路;假设有 22 个候选能效电厂,能效电厂和常规电厂参数分别见表 4 和表 5。假定每回线路的单位投资成本为 200 万元/km,给定的系统年度标煤消耗量上限和 SO₂ 排放总量上限分别为 5.5×10⁷ t 和 35000 t,能效电厂建设资金上限为 270000 万元。

下面分 3 种情况进行分析和比较:

a. 采用遗传算法和原对偶内点法联合求解本文所建的两层规划模型;

b. 在没有能效电厂时求解总投资成本最小的输电系统规划方案;

c. 计及能效电厂但不进行优化配置,直接将情况 a 中所得方案的能效电厂投资费用平均分配用于各能效电厂建设,求解总投资成本最小的输电系统规划方案。

用 A、B、C 分别表示以上 3 种情况所得的输电

表 3 18 节点系统支路参数

Tab.3 Branch data of 18-bus system

支路号	首节点	末节点	电抗	额定功率/MW	原有线路条数	长度/km
1	1	2	0.0176	2300	1	70
2	1	11	0.0102	2300	0	40
3	2	3	0.0348	2300	1	138
4	3	4	0.0404	2300	1	155
5	3	7	0.0325	2300	1	129
6	4	7	0.0501	2300	0	200
7	4	16	0.0501	2300	0	200
8	5	6	0.0267	2300	1	106
9	5	11	0.0153	2300	0	60
10	5	12	0.0102	2300	0	40
11	6	7	0.0126	2300	1	50
12	6	13	0.0126	2300	0	50
13	6	14	0.0554	2300	0	220
14	7	8	0.0151	2300	1	60
15	7	9	0.0318	2300	0	126
16	7	13	0.0126	2300	0	50
17	7	15	0.0448	2300	0	178
18	8	9	0.0102	2300	1	40
19	9	10	0.0501	2300	1	200
20	9	16	0.0501	2300	0	200
21	10	18	0.0255	2300	0	100
22	11	12	0.0126	2300	0	50
23	11	13	0.0255	2300	0	100
24	12	13	0.0153	2300	0	60
25	14	15	0.0428	2300	0	170
26	16	17	0.0153	2300	0	60
27	17	18	0.0140	2300	0	55

系统规划方案,具体结果见表 6。表中,新建线路括号内的数字表示需新增线路回路数,如 2(1)表示支路 2 新增 1 回线,其余类同。

由表 6 可见,与方案 B 相比,方案 A 的总投资成本增加了 197607 万元,主要原因是增加了能效电厂投资成本 231607 万元,但是方案 A 的输电线路投资成本减少了 34 000 万元,年度煤炭消耗量少了 3.8×10⁶ t,年度 SO₂ 排放量也少了 3 310 t。按照标煤单价 1000 元/t 和 SO₂ 排污费 1.26 元/kg 计算,方案 A 的年度发电成本比方案 B 减少了 380 000 万元,SO₂ 排污费减少了 417 万元。因此,虽然方案 A 比

表 4 18 节点系统能效电厂参数

Tab.4 EPP parameters of 18-bus system

EPP 编号	EPP 类别	节点 编号	容量/MW	单位投资成本/[万元·(MW) ⁻¹]	EPP 编号	EPP 类别	节点 编号	容量/MW	单位投资成本/[万元·(MW) ⁻¹]
1	EPP2	1	55.0	121	12	EPP1	9	310.8	99
2	EPP3	2	67.2	132	13	EPP6	9	129.5	200
3	EPP1	3	154.0	104	14	EPP2	10	75.2	120
4	EPP4	3	61.6	150	15	EPP1	11	910.0	101
5	EPP1	4	30.4	103	16	EPP6	11	350.0	202
6	EPP2	5	447.3	119	17	EPP1	12	190.0	103
7	EPP1	6	199.0	100	18	EPP2	13	88.0	119
8	EPP5	6	79.6	161	19	EPP5	14	32.0	170
9	EPP1	7	234.3	102	20	EPP3	15	80.0	131
10	EPP3	8	79.2	130	21	EPP1	16	145.2	105
11	EPP4	8	35.2	140	22	EPP2	17	360.0	123

表 5 18 节点系统发电机组煤耗及综合脱硫效率
Tab.5 Coal consumption and composite desulfurization rate of 18-bus system

发电厂节点号	发电煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	综合脱硫效率/%	发电厂节点号	发电煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	综合脱硫效率/%
2	303	93.1	14	300	95.2
5	290	96.4	16	297	94.6
10	295	96.1	18	315	91.0
11	305	95.5			

表 6 18 节点系统 3 种情况下的规划方案比较
Tab.6 Comparison among planning schemes for three cases of 18-bus system

方案	新建线路	总投资成本/万元	输电线路投资/万元	EPP 投资/万元	EPP 容量/MW	年度煤炭消耗量/t	年度 SO ₂ 排放量/t
A	1(1),2(2),7(1),10(1),12(1),13(2),14(2),16(1),17(1),18(2),19(3),21(1),22(1),25(1),26(2),27(1)	712 207	480 600	231 607	2 262	5.5×10 ⁷	32 764
B	1(1),2(2),7(1),10(1),12(1),13(2),14(2),16(1),17(1),18(2),19(3),21(1),22(1),25(2),26(2),27(1)	514 600	514 600	0	0	5.88×10 ⁷	36 074
C	1(1),2(2),7(1),10(1),11(1),12(2),13(2),14(2),17(1),18(2),19(3),21(1),22(1),25(1),26(2),27(1)	722 207	490 600	231 607	1 881	5.57×10 ⁷	34 080

方案 B 增加了能效电厂的投资,导致了总成本的增加,但是方案 A 降低了输电线路投资,并且大幅减少了年度煤炭消耗量和 SO₂ 排放量,满足了系统煤炭消耗总量和 SO₂ 排放总量的控制目标,同时大幅减少了年发电费用。

方案 C 中各候选能效电厂以平均费用进行建设,能效电厂容量为 1881 MW,负荷水平比方案 B 降低了 5.2%,输电线路投资、年度煤炭消耗量以及 SO₂ 排放量虽然都比方案 B 有较大降低,但是由于未经过优化配置,能效电厂的功效未能得到充分发挥。与方案 A 相比,方案 C 的能效电厂容量少了 381 MW,输电投资成本多了 10000 万元。

方案 A 和方案 C 的各能效电厂配置容量比较见表 7。对照表 7 和表 4 可知,方案 A 中对于单位投资成本较低的能效电厂优先给予配置,如编号为 9、12、15 的能效电厂等,而单位投资成本较高的能效电厂容量不予配置或者较少配置,如编号为 1、8、13 的

能效电厂等。方案 C 中能效电厂的容量没有经过优化配置,而是将投资费用平均分摊给各候选能效电厂,使得方案 C 建设得到的能效电厂总容量低于方案 A。能效电厂容量优化配置后,方案 A 的负荷水平更低,节点功率分布更加合理,从而使得方案 A 新增输电线路长度比方案 C 少了 50 km,减少了输电投资成本。

综合以上分析,由本文所建模型得到的方案 A 的社会经济效益最好。

4.2 46 节点系统

46 节点系统为巴西南部区域的简化电网。该系统现有 35 个节点、62 条线路,如图 2 所示。在未来某规划水平年,系统有 46 个节点,包括 12 个电源节点和 19 个负荷节点,总负荷为 6880 MW。所有支路(包括现有线路和新增候选线路)的数据见表 8,每条支路最大可扩建 3 条线路。发电机出力 and 负荷功率数据见表 9。关于该系统更详细的数据和说明可参见文献[16],原线路投资费用按照汇率 6.5 元/美元折算为人民币。假设有 24 个候选能效电厂,能效电厂和常规电厂参数分别见表 10 和表 11。给定系统年度标煤消耗量上限和 SO₂ 排放总量上限分别为 1.1×10⁷t 和 8000 t,能效电厂建设资金上限为 55000 万元。

按照 4.1 节中定义的 3 种情况对该系统进行求解,所得规划方案分别用 D、E、F 表示。这 3 种规划方案的比较结果见表 12。

由表 12 可见,与方案 E 相比,方案 D 增加了能效电厂的投资,导致了总成本的增加,但是降低了输电线路投资,并减少了年度煤炭消耗量和 SO₂ 排放量,满足了系统煤炭消耗和 SO₂ 排放总量的控制目标。方案 D 与方案 F 具有同样的能效电厂投资成本,但是方案 D 的总成本、输电投资成本、煤炭消耗

表 7 18 节点系统在 2 种情况下规划方案的 EPP 容量比较

Tab.7 Comparison of EPP capacity between planning schemes for two cases of 18-bus system

EPP 编号	节点 编号	EPP 容量/MW		EPP 编号	节点 编号	EPP 容量/MW	
		方案 A	方案 C			方案 A	方案 C
1	1	0	55.00	12	9	310.80	127.31
2	2	0	67.20	13	9	0	63.02
3	3	154.00	121.19	14	10	75.13	75.20
4	3	0	61.60	15	11	910.00	124.79
5	4	0	30.40	16	11	0	62.40
6	5	0.03	105.92	17	12	190.00	122.37
7	6	199.00	126.04	18	13	44.35	88.00
8	6	0	78.29	19	14	0	32.00
9	7	234.30	123.57	20	15	0	80.00
10	8	0	79.20	21	16	145.20	120.04
11	8	0	35.20	22	17	0.01	102.47

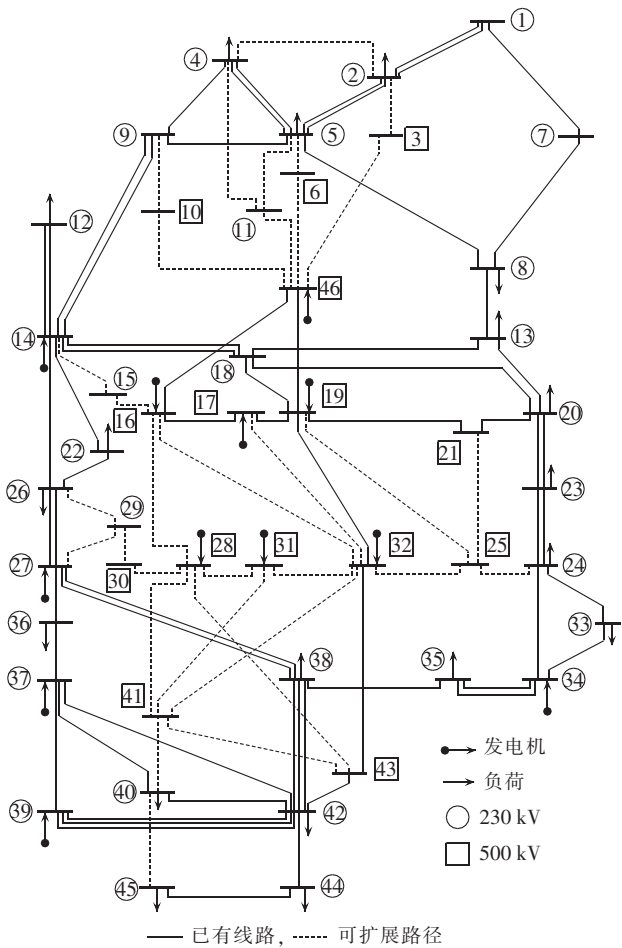


图 2 46 节点系统图

Fig.2 46-bus system

表 8 46 节点系统的支路参数

Tab.8 Branch data of 46-bus system

支路号	首节点	末节点	电抗	额定功率/MW	原有线路条数	单条支路投资/¥
1	1	7	0.0616	270	1	4349000
2	1	2	0.1065	270	2	7076000
3	4	9	0.0924	270	1	6217000
4	5	9	0.1173	270	1	7732000
5	5	8	0.1132	270	1	7480000
6	7	8	0.1023	270	1	6823000
7	4	5	0.0566	270	2	4046000
8	2	5	0.0324	270	2	2581000
9	8	13	0.1348	240	1	8793000
10	9	14	0.1756	220	2	11267000
11	12	14	0.0740	270	2	5106000
12	14	18	0.1514	240	2	9803000
13	13	18	0.1805	220	1	11570000
14	13	20	0.1073	270	1	7126000
15	18	20	0.1997	200	1	12732000
16	19	21	0.0278	1500	1	32632000
17	16	17	0.0078	2000	1	10505000
18	17	19	0.0061	2000	1	8715000
19	14	26	0.1614	220	1	10409000
20	14	22	0.0840	270	1	5712000
21	22	26	0.0790	270	1	5409000
22	20	23	0.0932	270	2	6268000
23	23	24	0.0774	270	2	5308000

续表

支路号	首节点	末节点	电抗	额定功率/MW	原有线路条数	单条支路投资/¥
24	26	27	0.0832	270	2	5662000
25	24	34	0.1647	220	1	10611000
26	24	33	0.1448	240	1	9399000
27	33	34	0.1265	270	1	8288000
28	27	36	0.0915	270	1	6167000
29	27	38	0.2080	200	2	13237000
30	36	37	0.1057	270	1	7025000
31	34	35	0.0491	270	2	3591000
32	35	38	0.1980	200	1	12631000
33	37	39	0.0283	270	1	2329000
34	37	40	0.1281	270	1	8389000
35	37	42	0.2105	200	1	13388000
36	39	42	0.2030	200	3	12934000
37	40	42	0.0932	270	1	6268000
38	38	42	0.0907	270	3	6116000
39	32	43	0.0309	1400	1	35957000
40	42	44	0.1206	270	1	7934000
41	44	45	0.1864	200	1	11924000
42	19	32	0.0195	1800	1	23423000
43	46	19	0.0222	1800	1	26365000
44	46	16	0.0203	1800	1	24319000
45	18	19	0.0125	600	1	8178000
46	20	21	0.0125	600	1	8178000
47	42	43	0.0125	600	1	8178000
48	2	4	0.0882	270	0	5965000
49	14	15	0.0374	270	0	2884000
50	46	10	0.0081	2000	0	10889000
51	4	11	0.2246	240	0	14247000
52	5	11	0.0915	270	0	6167000
53	46	6	0.0128	2000	0	16005000
54	46	3	0.0203	1800	0	24319000
55	16	28	0.0222	1800	0	26365000
56	16	32	0.0311	1400	0	36213000
57	17	32	0.0232	1700	0	27516000
58	19	25	0.0325	1400	0	37748000
59	21	25	0.0174	2000	0	21121000
60	25	32	0.0319	1400	0	37109000
61	31	32	0.0046	2000	0	7052000
62	28	31	0.0053	2000	0	7819000
63	28	30	0.0058	2000	0	8331000
64	27	29	0.0998	270	0	6672000
65	26	29	0.0541	270	0	3894000
66	28	41	0.0339	1300	0	39283000
67	28	43	0.0406	1200	0	46701000
68	31	41	0.0278	1500	0	32632000
69	32	41	0.0309	1400	0	35957000
70	41	43	0.0139	2000	0	17284000
71	40	45	0.2205	180	0	13994000
72	15	16	0.0125	600	0	8178000
73	46	11	0.0125	600	0	8178000
74	24	25	0.0125	600	0	8178000
75	29	30	0.0125	600	0	8178000
76	40	41	0.0125	600	0	8178000
77	2	3	0.0125	600	0	8178000
78	5	6	0.0125	600	0	8178000
79	9	10	0.0125	600	0	8178000

表 9 46 节点系统的节点参数
Tab.9 Bus data of 46-bus system

节点号	发电机功率/MW	负荷功率/MW	节点号	发电机功率/MW	负荷功率/MW	节点号	发电机功率/MW	负荷功率/MW
1	0	0	17	1000	0	33	0	229.1
2	0	443.1	18	0	0	34	221	0
3	0	0	19	773	0	35	0	216
4	0	300.7	20	0	1091.2	36	0	90.1
5	0	238	21	0	0	37	212	0
6	0	0	22	0	81.9	38	0	216
7	0	0	23	0	458.1	39	221	0
8	0	72.2	24	0	478.2	40	0	262.1
9	0	0	25	0	0	41	0	0
10	0	0	26	0	231.9	42	0	1607.9
11	0	0	27	54	0	43	0	0
12	0	511.9	28	730	0	44	0	79.1
13	0	185.8	29	0	0	45	0	86.7
14	944	0	30	0	0	46	599	0
15	0	0	31	310	0			
16	1366	0	32	450	0			

表 10 46 节点系统的能效电厂参数
Tab.10 EPP parameters of 46-bus system

EPP 编号	EPP 类别	节点 编号	容量/MW	单位投资成本/[万元·(MW) ⁻¹]	EPP 编号	EPP 类别	节点 编号	容量/MW	单位投资成本/[万元·(MW) ⁻¹]
1	EPP1	2	44.31	115	13	EPP2	23	27.49	115
2	EPP3	4	24.06	130	14	EPP2	24	43.04	122
3	EPP5	4	15.04	145	15	EPP4	26	18.55	140
4	EPP1	5	28.56	110	16	EPP3	33	16.04	132
5	EPP2	8	6.50	117	17	EPP6	35	10.80	200
6	EPP1	12	56.31	113	18	EPP5	36	7.21	163
7	EPP4	12	35.83	142	19	EPP3	38	19.44	135
8	EPP2	13	16.72	121	20	EPP1	40	31.45	116
9	EPP1	20	120.03	105	21	EPP1	42	144.71	114
10	EPP3	20	76.38	125	22	EPP3	42	112.55	134
11	EPP5	22	4.10	159	23	EPP1	44	8.70	107
12	EPP1	23	45.81	108	24	EPP2	45	7.80	123

表 11 46 节点系统的发电机组煤耗及综合脱硫效率
Tab.11 Coal consumption and composite desulfurization rate of 46-bus system

发电厂节点号	发电煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	综合脱硫效率/%	发电厂节点号	发电煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	综合脱硫效率/%
14	303	93.1	31	315	91.1
16	295	96.3	32	311	91.4
17	299	96.1	34	313	90.8
19	308	95.7	37	314	90.6
27	320	90.2	39	316	91.3
28	309	95.2	46	310	92.1

表 12 46 节点系统 3 种情况下的规划方案比较
Tab.12 Comparison among planning schemes for three cases of 46-bus system

方案	新建线路	总投资成本/万元	输电线路投资/万元	EPP 投资/万元	EPP 容量/MW	年度煤炭消耗量/t	年度 SO ₂ 排放量/t
D	3(1),11(1),16(1),18(1),20(1),46(2),47(2),49(2),50(1),52(2),54(1),59(1),60(1),61(1),62(1),63(1),64(1),66(1),70(1),71(1),73(1),74(3),75(1),76(1),77(1),78(2),79(1)	289144	250152	38992	348	1.094×10 ⁷	8000
E	11(1),16(1),18(1),2(1),46(2),47(3),49(2),50(1),52(2),53(1),54(1),59(1),60(1),61(1),62(1),63(1),65(1),67(1),68(1),71(1),73(1),74(3),75(1),76(1),77(1),78(1),79(1)	269506	269506	0	0	1.154×10 ⁷	8670
F	8(1),11(1),16(1),22(2),33(1),46(3),47(2),49(2),50(1),52(2),53(1),55(1),60(1),61(1),62(1),63(1),64(1),65(2),68(1),70(1),71(1),73(1),74(3),75(1),76(1),77(2),78(2),79(1)	296440	257448	38992	311	1.102×10 ⁷	8331

量以及 SO_2 排放量都小于方案 F。

分析以上结果,其主要原因为:方案 D 考虑了能效电厂的优化配置,降低了用电负荷,减少了常规电厂发电出力,系统的节点功率分布也更加合理,从而使得系统的输电投资成本、煤炭消耗量以及 SO_2 排放量比方案 E 和 F 都低,满足了煤炭消耗总量和 SO_2 排放总量的区域控制目标。

5 结语

本文提出了能效电厂的优化配置原则,之后首次将能效电厂引入输电系统规划之中,并以两层规划理论为基础,将能效电厂优化配置和输电系统优化规划结合起来,以输电线路投资和能效电厂投资的总成本最小为目标建立了计及能效电厂优化配置的输电系统两层规划模型。最后,采用遗传算法和原对偶内点法相结合的混合算法对所建输电系统规划模型进行求解,并用 18 节点和 46 节点系统 2 个算例说明了本文模型和算法的可行性与有效性。

通过在输电系统规划中考虑能效电厂的优化配置,可以增加能效电厂的建设容量,优化系统节点功率分布,并减少输电线路的投资成本;同时还可以减少煤炭消耗量和 SO_2 排放量,提高电力行业节能减排水平,满足区域煤炭消耗总量和 SO_2 排放总量控制的要求。

本文的研究表明,能效电厂的社会和经济效益明显,对完成国家节能减排目标具有重要作用。但是,能效电厂的大力推广还需要完善政策法规、组织模式和激励机制,尤其需要持久稳定的融资机制,这些问题都还需要进一步研究解决。

参考文献:

- [1] 河北省电力需求侧管理指导中心. 能效电厂项目市场化运作模式的研究课题研究报告[R/OL]. [2010-01-01]. <http://www.efchina.org/CSEPCN/FReports.do?act=detail&id=286>.
- [2] 吴鹏,谭显东,单葆国,等. 我国能效电厂建设试点分析[J]. 能源技术经济,2010,22(9):27-33.
WU Peng,TAN Xiandong,SHAN Baoguo,et al. Study on construction of experimental efficiency power plants in China[J]. Energy Technology and Economics,2010,22(9):27-33.
- [3] 周景宏,胡兆光,田建伟,等. 含能效电厂的电力系统生产模拟[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):27-31.
ZHOU Jinghong,HU Zhaoguang,TIAN Jianwei,et al. Power system production simulation including efficiency power plant[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(18):27-31.
- [4] 谭显东,胡兆光,彭谦. 考虑能效电厂的供需资源组合优化模型[J]. 电网技术,2009,33(20):108-112.
TAN Xiandong,HU Zhaoguang,PENG Qian. A resource combination optimization model considering efficiency power plant[J]. Power System Technology,2009,33(20):108-112.
- [5] 季强,李强,宋宏坤,等. 江苏省能效资源潜力及能效电厂研究[J]. 电力需求侧管理,2005,7(4):19-22.
JI Qiang,LI Qiang,SONG Hongkun,et al. Research on energy efficiency resources potential and efficiency power plant in

- Jiangsu[J]. Power Demand Side Management,2005,7(4):19-22.
- [6] 周景宏,胡兆光,田建伟,等. 电力综合资源战略规划模型与应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(11):19-22.
ZHOU Jinghong,HU Zhaoguang,TIAN Jianwei,et al. A power integrated resource strategic planning model and its application[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(11):19-22.
- [7] 中国赴美国能效电厂考察团. 美国加州能效电厂政策及实践考察报告[J]. 电力需求侧管理,2007,9(3):74-75.
Chinese Investigating Group to American Energy Efficiency Power Plant. Investigating report of the policy and practice of energy efficiency power plant in California[J]. Power Demand Side Management,2007,9(3):74-75.
- [8] 杜文,黄崇超. 求解两层规划问题的遗传算法[J]. 数学杂志,2005,25(2):167-170.
DU Wen,HUANG Chongchao. Genetic algorithms for bi-level programming[J]. Journal of Mathematics,2005,25(2):167-170.
- [9] 朱法华,杜维鲁. 燃煤电厂 SO_2 排放量确定方法研究[J]. 电力环境保护,2009,25(2):1-4.
ZHU Fahua,DU Weilu. Study on the calculation method of SO_2 emission from coal-fired power plants[J]. Electric Power Environmental Protection,2009,25(2):1-4.
- [10] 谢敬东,王磊,唐国庆. 遗传算法在多目标电网优化规划中的应用[J]. 电力系统自动化,1998,22(10):20-22.
XIE Jingdong,WANG Lei,TANG Guoqing. The application of genetic algorithm algorithm in the multi-objective transmission network optimization planning[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(10):20-22.
- [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):1168-1174.
- [12] WEI H,SASAKI H,YOKOYAMA R. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13(3):870-877.
- [13] 范宏,程浩忠,金华征,等. 考虑经济性可靠性的输电网两层规划模型及混合算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):1-7.
FAN Hong,CHENG Haozhong,JIN Huazheng,et al. Transmission network bi-level programming model considering economy and reliability and hybrid algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):1-7.
- [14] 刘志鹏,文福拴,薛禹胜,等. 电动汽车充电桩的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化,2012,36(3):54-59.
LIU Zhipeng,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(3):54-59.
- [15] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社,1990:279-282.
- [16] ROMERO R,MONTICELLI A,GARCIA A,et al. Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2002,149(1):27-36.

作者简介:

郑 静(1980-),女,江苏泰州人,博士研究生,从事电力系统规划和智能电网方面的研究(E-mail:jingzheng80@gmail.com);

文福拴(1965-),男,河南安阳人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场方面的研究(E-mail:fushuan.wen@gmail.com);

李 力(1968-),女,河北任丘人,高级工程师,硕士,从事电力系统运行方式策划和运行管理工作。

(下转第 31 页 continued on page 31)

- (14):114-119.
- LIAO Ruijin,YANG Lijun,SUN Caixin,et al. Aging condition assessment of oil-paper based on principal component and factor analysis of partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(14):114-119.
- [12] 李岳,吕克洪. 主成分分析在铁谱磨粒识别中的应用研究[J]. 国防科技大学学报,2004,26(1):89-94.
- LI Yue,LÜ Kehong. The application of the Principal Components Analysis (PCA) to debris recognition[J]. Journal of National University of Defense Technology,2004,26(1):89-94.
- [13] 许力,竺鹏东,顾宏杰,等. 基于变尺度 PCA 的电力设备载流故障早期预警[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):147-151.
- XU Li,ZHU Pengdong,GU Hongjie,et al. Early warning of electric equipment current-carrying faults based on variable-scale principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):147-151.
- [14] 王辉,王克奇. 基于主分量分析木材纹理的特征提取[J]. 森林工程,2006,22(6):14-16.
- WANG Hui,WANG Keqi. The extraction of wood texture features based on PCA[J]. Forest Engineering,2006,22(6):14-16.
- [15] 石敏,吴正国,徐袭. 基于概率神经网络和双小波的电能质量扰动自动识别[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):5-8.
- SHI Min,WU Zhengguo,XU Xi. Auto recognition of power quality disturbance based on probabilistic neural networks and double wavelet[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(3):5-8.
- [16] 王柏生,倪一清,高赞明. 用概率神经网络进行结构损伤位置识别[J]. 振动工程学报,2001,14(1):60-64.
- WANG Baisheng,NI Yiqing,GAO Zanming. Structural damage localization using probabilistic neural network[J]. Journal of Vibration Engineering,2001,14(1):60-64.

作者简介:

苑津莎(1957-),男,河北保定人,教授,博士研究生导师,研究方向为智能信息处理、电磁场理论及应用;
尚海昆(1984-),男,河北保定人,博士研究生,研究方向为电气设备故障诊断(E-mail:shikey007@sina.com)。

Pattern recognition based on principal component analysis and probabilistic neural networks for partial discharge of power transformer

YUAN Jinsha,SHANG Haikun

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

Abstract: For reducing the high dimension of original characteristic parameters in partial discharge pattern recognition of power transformer,PCA(Principal Component Analysis) is applied to extract new principal component factors,which represents the original characteristic parameters sufficiently. PNN(Probabilistic Neural Network) classifier is used to train and recognize the characteristic vectors before and after the dimension reduction respectively. It is found that,the extraction of new principal component factors mitigates effectively the load of PNN classifier and its effectiveness of pattern recognition is better than that of traditional BPNN classifier.

Key words: principal component analysis; probabilistic neural network; power transformers; partial discharge; pattern recognition

(上接第 20 页 continued from page 20)

Two-level planning of transmission system with optimal placement of efficiency power plants

ZHENG Jing¹,WEN Fushuan¹,LI Li²,WANG Ke²,GAO Chao²

(1. School of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Guangdong Power Dispatching Center, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The principle of optimal EPP(Efficiency Power Plant) placement is proposed and with the consideration of the optimal EPP placement,a two-level planning model based on two-level planning theory is developed for transmission system,of which,the upper model takes the minimum total cost of transmission system and EPP investment as its objective while the lower model takes the minimum cost of EPP investment as its objective. With the interaction between two levels,the transmission system planning scheme is finally determined by the upper model. A hybrid algorithm combining genetic algorithm and primal-dual interior method is adopted to solve the proposed planning model. Results of case study for 18-bus and 46-bus systems verify the feasibility and efficiency of the proposed model and algorithm.

Key words: transmission system; efficiency power plant; planning; genetic algorithms; primal-dual interior method; models