文章编号:0254-0096(2020)05-0250-08

含能效电厂的计及线损率的多目标低碳电源规划

张晓辉[1]，陈 冰[1]，贺 勇[1]，闫鹏达[2]，胡佳琳[3]，钟嘉庆[1]

（1. 燕山大学河北省电力电子节能与传动控制重点实验室，秦皇岛 066004；2. 国网山西省电力公司检修分公司，太原 030006；
3. 中国电能成套设备有限公司，北京 100080）

摘 要：为应对电力用户所配备电气设备消耗电力较大所造成的发电资源浪费严重的情况，同时也考虑到需求侧资源在供需平衡中的潜力，因此将电力需求侧的能效电厂纳入电源规划中。该文综合考虑碳排放量最少和综合成本最小，建立计及能效电厂的多目标电源规划模型，并在约束条件中增加线损率约束，最后采用离散细菌群体趋药性算法对所建模型进行求解。通过对不同碳排放限额、不同线损率分别进行灵敏度分析，得出随着碳排放控制限额的降低，清洁能源机组投建较多，随着线损率的降低，投建的能效电厂减少的结论，通过仿真验证该文所提电源规划模型的有效性和结论的正确性。

关键词：电源规划；排放控制；线损率；能效电厂；离散细菌群体趋药性算法

中图分类号：TM71 **文献标志码**：A

0 引 言

在电源规划的过程中，国内外学者均会考虑低碳减排的影响，文献[1-2]将低碳经济及碳排放约束引入到模型中，建立低碳电源规划模型。文献[3]将碳排放成本引入目标函数中，考虑规划的低碳效益。文献[4]将各种能源发电的减排效益引入电源规划之中。目前，国内外研究学者大都是以总成本或总投资最小的单目标函数作为目标函数进行电源规划。文献[5]在规划电网的同时对电源规划方案进行反馈和微调，以经济性最优为目标，建立规划模型。文献[6]提出在保证系统可靠运行的同时，尽量减少输电线路的安装成本、常规发电机组的年运行费用。

本文考虑低碳性和经济性2个方面，提出考虑碳排放量最少和综合成本最小的多目标电源规划模型。电力需求侧管理提供了一种将电力需求侧资源作为电力供应侧的可替代资源的理念。文献[7-8]建立了将作为需求侧资源的能效电厂与供应侧资源同等纳入电力规划的综合资源战略规划模型。文献[9]针对计及区域风光出力的同时，如何利用电动汽车有序充电对负荷曲线的峰谷差进行优化的问题，提出优化模型与方法。文献[10]考虑到空调-建筑系统具有热储备能力，可将其等效为一种虚拟储能装置参与到需求侧响应中。然而，需求侧管理措施种类繁多，量大面广，如果对每个措施进行分析与运作将会使项目管理难度增加，成本也会相应增大。为此，提出能效电厂这一解决方案。文献[11]将电力需求侧的能效电厂纳入电力规划统筹考虑，提出了源网荷协同规划的概念。文献[12]提出将能效电厂与供应侧资源同等纳入电源规划的混合整数规划模型。

细菌群体趋药性算法（bacterial colony chemotaxis，BCC）具有可全局搜索、收敛快、精度高等特点，在电力系统领域应用的较为广泛[13]。一些学者还将BCC算法应用于充电站容量规划研究[14]、碳捕集系统优化配置[15]、电网的灾后抢修[16]、电网经济优化调度[17]方面。

从整个电源规划来看，需要考虑到输电网络的线损情况。针对线损率计算问题，部分学者提出一些计算方法[18]。

1 含能效电厂的计及线损率的多目标低碳电源规划模型

鉴于国家和政府近些年来提出的节能减排要求，本

收稿日期：2017-10-19
基金项目：国家自然科学基金（61873225）；河北省高等学校科学技术研究重点项目（ZD2016049）；燕山大学青年教师自主研究计划课题（16LGA006）
通信作者：陈 冰（1992—），女，硕士研究生，主要从事电力系统优化调度与经济运行方面的研究。1016233552@qq.com

文将能效电厂引入电源规划，建立含能效电厂的计及线损率的综合考虑碳排量最少和综合成本最小的多目标电源规划模型。

1.1　目标函数

1.1.1　综合成本最小目标

综合成本包括燃煤机组、光伏电站、风电场、水电机组的投资成本、运行维护成本，燃煤机组的燃料成本及能效电厂的投资成本，具体模型为：

$$F_1=\min\sum_{t=1}^{T}(1+r)^{-t}(C_c^t+C_n^t+C_y^t+C_f^t) \tag{1}$$

式中，F_1——综合成本，¥；T——总的规划期，a；r——贴现率；C_c^t——第 t 年机组的投资成本，¥；C_n^t——第 t 年能效电厂的投资成本，¥；C_y^t——第 t 年机组的运行维护成本，¥；C_f^t——第 t 年燃煤机组的燃料成本，¥。

1）机组的投资成本

投资成本是和容量有关的固定成本部分，它不会随发电机组的出力变化和电量的多少而变化。

第 t 年发电机组投资成本函数为：

$$C_c^t=\sum_{i\in\Omega_c}P_i b_i d_{it}\frac{r}{1-(1+r)^{-N_i}} \tag{2}$$

式中，Ω_c——待建机组；P_i——机组 i 的装机容量，MW；b_i——机组 i 的单位投资成本，¥/MW；d_{it}——0 或 1 变量，表示第 t 年发电机组 i 是否投建，$d_{it}=1$ 表示第 t 年发电机组 i 进行了投建，$d_{it}=0$ 表示第 t 年发电机组 i 未进行投建；N_i——机组 i 的使用年限。

2）能效电厂的投资成本

能效电厂（efficiency power plant，EPP）是一种虚拟电厂，即通过实施一揽子节电计划和能效项目，获得需方节约的电力资源。国际能源界将实施电力需求侧管理，开发、调度需方资源所形成的能力，形象地命名为能效电厂。能效电厂的投资成本是指完成同样功效的节能设备与常规设备的购置成本的差值。

第 t 年能效电厂投资成本函数为：

$$C_n^t=\sum_{j\in\Omega_n}B_j P_{jt} D_{jt}\frac{r}{1-(1+r)^{-N_j}} \tag{3}$$

式中，Ω_n——待建能效电厂；B_j——第 j 类能效电厂的单位投资成本；P_{jt}——第 t 年第 j 类能效电厂的装机容量，MW；D_{jt}——0 或 1 变量，表示第 t 年第 j 类能效电厂是否进行投建，$D_{jt}=1$ 表示第 t 年第 j 类能效电厂进行了投建，$D_{jt}=0$ 表示第 t 年第 j 类能效电厂不进行投建；N_j——第 j 类能效电厂的使用年限，a。

假设寿命不同，则第 j 类能效电厂单位投资成本为：

$$B_j=\frac{C_j-C_b\cdot\dfrac{A_j}{A_b}}{F_j-F_b} \tag{4}$$

式中，C_j——第 j 类能效电厂的投资成本，万¥；A_j——第 j 类能效电厂的寿命，h；F_j——第 j 类能效电厂装机容量，MW；C_b——常规机组的投资成本，万¥；A_b——常规机组的寿命，h；F_b——常规机组的装机容量，MW。

3）机组的运行维护成本

维护成本是和机组发电量相关的可变成本部分，它随发电量的变化而变化。

机组的运行维护成本函数为：

$$C_y^t=\sum_{i=1}^{N}C_i P_{it} H_{it} \tag{5}$$

式中，C_i——机组 i 的单位运行成本，¥/MWh；N——第 t 年系统拥有的机组数量；P_{it}——第 t 年机组 i 的装机容量，MW；H_{it}——第 t 年机组 i 的年利用时间，h。

4）燃料成本

由于光伏、风电和水电不耗用燃料，因此其燃料费用为零，因此燃料成本仅有燃煤费用。

$$C_f^t=\sum_{i=1}^{N_h}F_{it}P_{it}H_{it} \tag{6}$$

式中，F_{it}——机组 i 第 t 年的单位发电量的燃料成本，¥/MWh；N_h——第 t 年系统拥有的燃煤机组的数量。

1.1.2　碳排放量最少目标

燃煤机组在运行过程中会产生大量的污染气体、碳化物等。如果只考虑综合成本最小，电力负荷和用电量的要求得不到满足，在规划过程中就有可能较多的选择装机容量较大的燃煤机组，因而可能会引起大量的燃料消耗和污染气体排放，因此本文将碳排放量最少也作为一个目标函数，在考虑经济性的同时兼顾了环保性。

碳排放量最少目标函数：

$$F_2=\min\sum_{i=1}^{N_h}\gamma_1(P_{G_i}^t)^2+\gamma_2P_{G_i}^t+\gamma_3+\gamma_4 e^{\varepsilon P_{G_i}^t} \tag{7}$$

式中，$P_{G_i}^t$——第 t 年机组 i 中燃煤机组的出力，MW；γ_1、γ_2、γ_3、γ_4、ε——排污系数。

1.2　约束条件

1.2.1　电力约束

第 t 年，机组和能效电厂的装机容量之和不应小于系统在第 t 年时的最大负荷需求。

$$(1-S)\sum_{i=1}^{N}P_{it}+(1-S)\sum_{j=1}^{M}P_{jt}\geqslant(1+\eta)P_t \tag{8}$$

式中，S——线损率；P_t——系统在第 t 年的最大负荷，MW；N——第 t 年时拥有的机组数量；M——第 t 年时拥有的能效电厂数量；η——备用系数。

1.2.2 电量约束

第 t 年时，机组与能效电厂的发电量之和应不小于留有一定余量的用电量。

$$(1-S)\sum_{i=1}^{N}P_{it}H_{it}+(1-S)\sum_{j=1}^{M}P_{jt}H_{jt}\geqslant(1+\theta)E_t \tag{9}$$

式中，E_t——第 t 年时需求电量的预测值，MW；θ——用电余量系数。

1.2.3 机组的装机规模约束

由于社会资源、资金、技术、政策等因素的限制，在短期内不可能实现大规模装机，所以每年各类常规机组的装机规模不能够超过一定的限度。

$$P_{it}\leqslant P_{it}^{\max} \tag{10}$$

式中，$P_{it}^{\max}$——第 t 年机组 i 的最大装机容量，MW。

1.2.4 能效电厂装机规模约束

受节电潜力的约束，能效电厂不能无限制的投建，每年各类能效电厂的装机容量不能超过预计该类用电设备电力负荷的一定比例。

$$P_{jt}\leqslant\delta P_{jt}^{\max} \tag{11}$$

式中，δ——第 t 年第 j 类能效电厂占该类用电设备电力负荷的比例系数；$P_{jt}^{\max}$——第 t 年第 j 类能效电厂的最大装机容量，MW。

1.2.5 CO_2排放约束

规定 CO_2 排放量不大于所规定的 CO_2 排放限额。

$$\sum_{i=1}^{N}\zeta_i^{CO_2}P_{it}H_{it}\leqslant C_t^{CO_2} \tag{12}$$

式中，$\zeta_i^{CO_2}$——机组 i 的 CO_2 排放系数，t/MWh；$C_t^{CO_2}$——第 t 年系统的 CO_2 排放限额，t。

1.2.6 线损率约束

电力系统中电能是通过电力网的输电、变电和配电环节供给用户的。在电能传输过程中，经过变压器升压降压、输电线路、测量保护等设备都要消耗一定量的电能。在统计时间内，系统中设备原件所产生的电能损耗称为线损电量，通常线损是通过“总供电量”和“总售电量”相减得到的，线损电量占供电量百分数称为线损率，即：

$$S=\frac{E_g-E_s}{E_g}\times100\%=\frac{\Delta E}{E_g}=\frac{\Delta P}{P}\leqslant12\% \tag{13}$$

式中，ΔE——损耗电量，MWh；E_g——发电量，MWh；E_s——售电量，MWh；ΔP——有功功率损耗，MW；P——输入有功功率，MW。

对式(13)可进一步计算[18]，即：

$$S=\frac{\Delta P}{P}=\frac{3\times I^2\times R}{\sqrt{3}UI\cos\phi} \tag{14}$$

式中，I——首端电流，A；U——首端电压，V；R——输电线路电阻；$\cos\phi$——功率因数。

1.2.7 线损成本约束

根据某地区的实际情况，对该地区的线损成本进行相关约束。即：

$$Z=\Delta E\times D\leqslant3.7\times10^8 \tag{15}$$

式中，Z——该地区全年线损成本，¥；D——冀北地区电价，0.55 ¥/kWh。

本文取线损率为经验值 9% 时的线损成本（3.7×10^8 ¥）作为约束条件，对实际线损成本进行约束。根据式(13)来求取线损，由式(15)求取线损成本。

2 算例分析

2.1 日负荷曲线

算例中，将某实际地区 1 年的规划时间段划分为春夏秋冬四季，分别取 4 个季节的 4 个典型日负荷曲线作为规划期的水平年日负荷曲线，如图 1 所示。分别取春夏秋冬四季的典型日负荷的总和，之后再与 90 d 相乘即可得年负荷电量预测值。

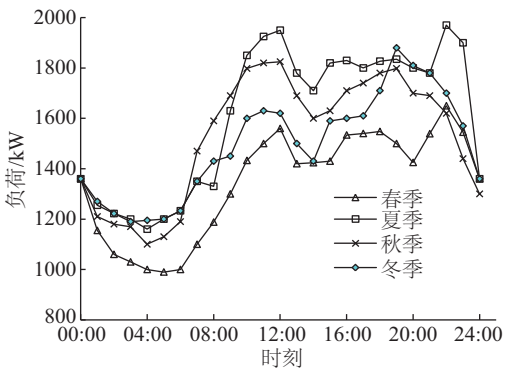

图1 典型日负荷曲线

Fig. 1 Day load curve

2.2 优化算法

由于电源规划问题本质上为离散优化问题，本文将采用离散细菌群体趋药性(discrete bacterial colony chemotaxis，DBCC)算法优化求解[13]。

2.3 基础数据

假设贴现率为 0.05，η 为 5%，每年最大碳排放限

额均为 1 万 t，系统备用容量为 16%，燃煤机组单位发电量的燃料成本为 78.432 ¥/MWh。燃煤机组碳排放强度为 0.746 t/MWh。能效电厂及清洁能源碳排放强度为 0。第 t 年第 j 类能效电厂的最大装机容量 $P_{it}^{\max}$ 分别取火电机组为 1500 MW，光伏电站 240 MW，风电场 400 MW，水电机组 400 MW。第 t 年第 j 类能效电厂的最小装机容量 $P_{jt}^{\max}$ 分别取节能灯 120 MW，高效家电 80 MW，节能电机 100 MW。第 t 年第 j 类能效电厂占该类用电设备电力负荷的比例系数 δ 不能超过 10%。该地区未来 5 年内的负荷增长预测数据如表 1 所示。系统原有机组参数如表 2 所示。规划期内可建机组参数如表 3 所示。规划期内待建能效电厂参数如表 4 所示。

表 1　规划期内负荷增长预测量

Table 1　Load growth forecast in planning period

年份	年最大负荷/MW	年用电量/亿 kWh
2018	2900.0	90.00
2019	3271.2	104.20
2020	3828.0	122.00
2021	4466.0	153.24
2022	5127.2	173.62

表 2　原有机组参数

Table 2　Parameters of existed units

参数	燃煤机组	风电场	水电机组
单机容量/MW	300	100	200
运行维护成本/¥·MWh^{-1}	285.6	80.0	30.0
碳排放强度/t·MWh^{-1}	0.746	0.000	0.000
年利用小时数/h	6000	2400	3000
原有机组最小出力技术/MW	0.75	0.00	0.00
原有机组数量/台	6	7	3

表 3　规划期内可建机组参数

Table 3　Parameters of units to be installed in planning period

参数	燃煤机组	光伏电站	风电场	水电机组
单机容量/MW	300	60	100	200
运行维护成本/¥·MWh^{-1}	285.6	120.0	80.0	30.0
单台投资成本/亿¥	12.9	3.0	8.0	5.5
年利用小时数/h	6000	2000	2400	3000
使用年限/a	25	25	20	30
最小出力技术	0.75	0	0	0
数量	10	4	4	2

表 4　规划期内待建能效电厂参数

Table 4　Parameters for EPP to be planned for planning period

参数	节能灯	高效家电	节能电机
单个容量/MW	120	80	100
单位投资成本/¥·MWh^{-1}	433.33	3000.00	1439.02
年利用时间/h	2500	2000	4000
使用年限/a	2	10	10
原有机组最小出力技术/MW	0.67	0.63	0.63
原有机组数量/台	1	2	2

2.4　仿真结果

在基准方案下，采用 DBCC 进行仿真，获得规划期内新建机组及能效电厂的装机容量，如图 2 所示。规划期内碳排放量变化的趋势见图 3。

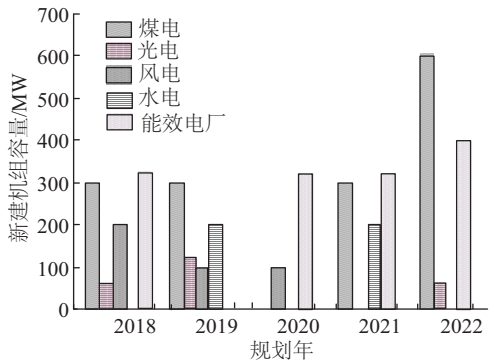

图 2　规划期内新建机组及能效电厂的装机容量

Fig. 2　Installed capacity of new generating units and EPP in planning period

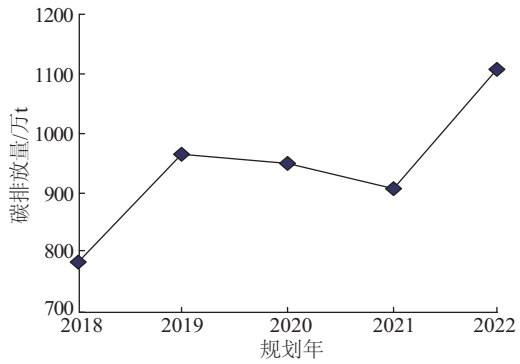

图 3　规划期内碳排放量

Fig. 3　Carbon emissions in planning period

规划期内,各项成本折算成现值如表5所示。规划期内每年的碳排放量见表6。从仿真结果可看出规划前期(2018~2019年)投建了2台燃煤机组,为满足负荷以及用电量需求,同时为尽可能地减少碳排放量还投建零碳排放的风电场和光伏电站各3个,但因风电场和光伏电站的出力间隙性等其他不确定性问题的存在,为保证电力的不间断供应,还投建了1台运行成本较低的水电机组。

表5 规划期内各项成本

Table 5 Costs in planning period

成本		2018	2019	2020	2021	2022
机组投资成本/亿¥	燃煤	0.915290	0.915290	0.000000	0.915290	1.830600
	光电	0.212860	0.425710	0.000000	0.000000	0.212860
	风电	1.283880	0.641960	0.641960	0.000000	0.000000
	水电	0.000000	0.357780	0.000000	0.357780	0.000000
投资成本合计/亿¥		2.412030	2.34074	0.641960	1.273070	2.043460
机组运维成本/亿¥	燃煤	29.965400	36.932300	36.307000	34.700000	42.412000
	光电	0.059700	0.361030	0.210359	0.086400	0.257786
	风电	1.344719	1.616443	1.814247	1.584000	1.716305
	水电	0.478047	0.566136	0.658017	0.607500	0.713490
运维成本合计/亿¥		31.847886	9.4759093	38.989623	36.977900	45.099581
能效电厂投资成本/亿¥		0.652380	0.000000	0.652380	0.652380	0.963190
燃料成本/亿¥		8.229200	10.143000	9.970700	9.529488	11.647000
综合成本/亿¥		43.141496	51.959649	50.254663	48.432838	59.753231

表6 规划年内碳排放量

Table 6 Carbon emissions in planning period

年份	碳排放量/t	年份	碳排放量/t
2018	7.827×10^6	2021	9.064×10^6
2019	9.647×10^6	2022	11.078×10^6
2020	9.484×10^6	—	—

从表5中可看出2019年综合成本较2018年增长了8.818153亿¥。这是因为在2018年和2019年,原有的机组不能满足用户电力负荷和电量的需求,因此需要投建较多的机组,从而机组的投资成本、机组的运行维护成本燃料成本均相应增加,所以呈现综合成本上升的趋势。图2中,在2020年时,未投建燃煤机组,但投建1个风电场。由碳排放量的曲线图(图3)可看出在2019~2020年碳排放量呈下降趋势。其原因是2019~2020年之间,燃煤机组的投建容量减少,相应的各清洁能源的投建容量增大,即在2019~2020年将建设一定容量的清洁能源代替燃煤机组出力,实现了在满足负荷需求的基础上减少碳排放量的要求。从表5中可看出2020年的综合成本较2019年减少了1.821825亿¥,这是因为在2020年时,现有机组所供应的电量接近电力用户的需求,无需投建装机容量较大的燃煤机组,仅投建了1个风电场,因此综合成本较小。

2021年之后,系统的装机容量同系统预测的最大年负荷接近,并且受碳排放的限制,投建了清洁能源风电场和光伏电站,同时为尽可能减少投资成本,投建了节能灯、高效家电、节能电机等能效电厂。如图3所示,在2021年,碳排放量达到最低,即表明在整个系统中,清洁能源的出力达到最大状态,同时也体现了能效电厂的节能减排的作用。如表5所示,2021年的综合成本在5年中是最小的,为48.432838亿¥,这是因为在2021年现有机组所分配的发电量较为平均,不需要集中在某台或者是某几台机组发电,所以机组的运行维护成本较低,综合成本达到最小。在2022年,原有机组出力已不能满足在该规划年的负荷以及电量需求,同时候选机组还有7台燃煤机组和1个光伏电站,在尽可能满足负荷和电量需求的同时使得综合成本最小,该规划年投建了2台燃煤机组,1个光伏电站。如表5所示,2022年的综合成本是5年中最大的,为59.7526亿¥。为满足电力用户的用电要求,投建了2台成本较高的燃煤机组,同时在2022年机组数量最多,发电量最大,机组的运行成本最大,为45.099亿¥,因此综合成本最大。

2.5　灵敏度分析

2.5.1　不同碳排放限额对规划方案的影响

在基准方案下，以 2018 年为基准，分别将碳排放限额上调 30%和下调 30%，得到不同碳排放限额下的规划方案如图 4 所示。从图 4 可看出将碳排放限额上调时，投建了 2 台燃煤机组和 5 个能效电厂，分别为 1 个节能灯、2 个高效家电和 2 个节能电机。在中碳排放限额时投建了 1 台燃煤机组，1 个光伏电站、2 个风电场和 3 个能效电厂，分别为 1 个节能灯、2 个节能电机。将碳排放限额下调时，投建 2 个光伏电站、2 个风电场和 1 个水电机组，未投建高碳排放量的燃煤机组。由此可知：在碳排放限额较高时，对于碳排放的要求较低，系统仅投建了 2 台装机容量较高的燃煤机组，就可满足电力负荷和电量的需求，但同时也投建了 5 个能效电厂，这是因为在碳排放要求不高的情况下，多投建能效电厂有利于最大程度的减少碳排放。之后，随着碳排放限额的降低，对于系统的碳排放量的限制越来越高，但由于电源的发电需要满足系统电力负荷与电量的需求，因此需增设碳排放强度为零的清洁能源机组以满足各种用电要求，也即在碳排放上限低时所额外投建的 1 个光伏电站和 1 台水电机组代替了碳排放上限高时的 1 台燃煤机组。清洁能源的投建，大大减少了碳排放量，从而达到节能减排的目的。

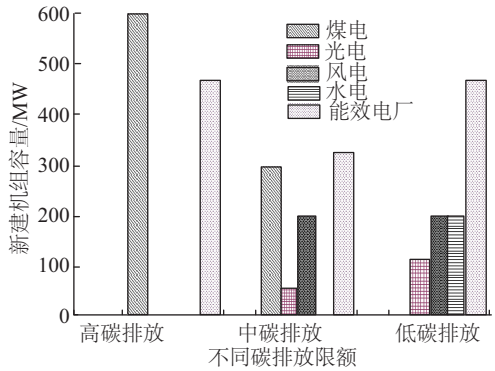

图4　不同碳排放限额下新建机组及能效电厂的装机容量

Fig. 4　Installed capacity of new units and EPP under different carbon emissions

2.5.2　不同线损率对规划方案的影响

在基准方案下，以 2018 年为基准，在低线损率限额(7%)、中线损率限额(9%)、高线损率限额(11%)情况下的规划方案如图 5 所示。从图 5 可看出当高线损率限额(11%)时，投建有 1 台燃煤机组、2 个光伏电站、2 个风电场、1 台水电机组和 3 个能效电厂，分别为 1 个节能灯、1 个高效家电和 1 个节能电机。这是因为当线损率限额较高(11%)时，网络损耗较大，使能效电厂作用于负荷的出力减小，为了达到节能减排的效果，就会增加清洁能源的建设，因此，额外投建了 1 个光伏电站和 1 台水电机组。当线损率稍低(9%)时，系统投建有 1 台燃煤机组、1 个光伏电站、2 个风电场、1 台水电机组和 3 个能效电厂，分别为 1 个节能灯和 2 个节能电机。当线损率取 7%时，系统投建有 1 台燃煤机组、2 个光伏电站、2 个风电场和 1 个能效电厂，即 1 个高效家电。这是因为当线损率限额越低(7%)时，能效电厂作用于负荷的出力增大，相应的减少能效电厂的投建，为了满足电力要求，额外投建了 1 个光伏电站。综合上述 3 个仿真结果，在电源规划过程中需要考虑线损率的影响，当线损率越低时，投建机组越少，也即成本越小，越能保证经济性。

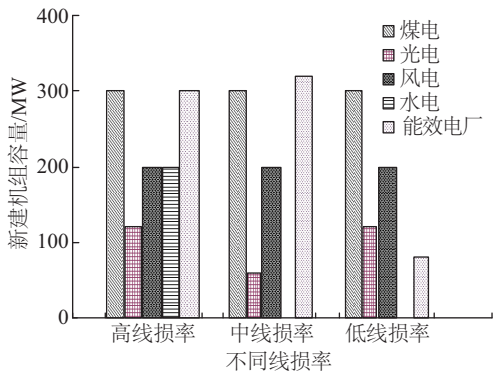

图5　不同线损率下新建机组及能效电厂的装机容量

Fig. 5　Installed capacity of new units and EPP under different line loss rate

3　结　论

为响应国家所推行的节能减排政策，同时考虑到在规划过程中尽量降低成本，因此本文综合考虑了系统碳排放量与综合成本 2 个因素，建立计及线损率约束的多目标电源规划模型。最后应用 DBCC 算法进行相关验证。

通过模型及仿真结果，说明在模型中引入能效电厂有效的起到了节能减排的作用。同时，本文所建立的碳排放量最少和综合成本最小的计及线损率的多目标规划模型，能够统筹考虑整个系统生产电力的经济性与低碳性，更加符合当今社会的发展。

[参考文献]

[1]　WU Y W, LOU S H, LU S Y. A model for power system interconnection planning under low- carbon economy with CO_2 emission constraints[J]. IEEE transactions on

sustainable energy, 2011, 2(3): 205-214.

[2] 罗金山, 路畅, 孟繁骏. 碳排放及燃煤约束下的电源规划及其效益评价[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 47-52.
LUO J S, LU C, MENG F J. Generation expansion planning and its benefit evaluation considering carbon emission and coal supply constraints[J]. Automation of electric systems, 2016, 40(11): 47-52.

[3] JING Q, ZHAO Y D, ZHAO J H, et al . Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. IEEE transactions on power systems, 2015, 30(2): 1305-1046.

[4] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生电源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 11-15.
DUAN J M, WANG Z X, WANG C M, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power system technology, 2015, 39(1): 11-15.

[5] 穆永铮, 鲁宗相, 周勤勇, 等. 基于可靠性均衡优化的含风电电网协调规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 16-22.
MU Y Z, LU Z X, ZHOU Q Y, et al. Optimized reliability balancing based transmission coordinating expansion planning for power grid with wind farms[J]. Power system technology, 2015, 39(1): 16-22.

[6] UGRANLI F, KARATEPE E, NIELSEN A H. MILP approach for bilevel transmission and reactive power planning considering wind curtailment [J]. IEEE transactions on power systems, 2017, 32(1): 652-661.

[7] 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): 47-52.
ZHOU J H, HU Z G, TIAN J W, et al. Strategic planning model and application of electric power comprehensive resource[J]. Automation of electric power systems, 2010, 34(11): 47-52.

[8] AKASIADIS C, CHALKIADAKIS G. Mechanism design for demand-side management[J]. IEEE intelligent systems, 2017, 32(1): 24-31.

[9] 葛少云, 郭建炜, 刘洪, 等. 计及需求侧响应及区域风光出力的电动汽车有序充电对电网负荷曲线的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1806-1811.
GE S Y, GUO J W, LIU H, et al. Impacts of electric vehicle's ordered charging on power grid load curve considering demand side response and output of regional wind farm and photovoltaic generation[J]. Power system technology, 2014, 38(7): 1806-1811.

[10] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 395-402.
WANG Y L, TONG Y B, HUANG M, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power system technology, 2017, 41(2): 395-402.

[11] 张宁, 胡兆光, 周渝慧, 等. 计及随机模糊双重不确定性的源网荷协同规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 39-45.
ZHANG N, HU Z G, ZHOU Y H, et al. Source-grid-load coordinated planning model considering randomness and fuzziness[J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(1): 39-45.

[12] 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 X D, HU Z G, PENG Q. A resource combination optimization model considering efficiency power plant [J]. Power system technology, 2009, 33(20): 108-112.

[13] 张晓辉, 闫鹏达, 葛顺平, 等. 可再生能源激励制度下多场景灵活电源规划[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3): 26-35.
ZHANG X H, YAN P D, GE S P, et al. Multi-scenario flexible generation expansion planning under incentive system of renewable energy[J]. Advanced technology of electrical engineering and energy, 2016, 35(3): 26-35.

[14] 杨丽君, 郭茜茜, 闫鹏达. 考虑电池组配送的集中型充电站容量规划研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1388-1394.
YANG L J, GUO Q Q, YAN P D. Study on capacity planning of large- scale centralized charging stations considering distribution scheme on battery pack[J]. Power system technology, 2016, 40(5): 1388-1394.

[15] 卢志刚, 夏明昭, 张晓辉. 基于多阶段减排规划的发电厂碳捕集系统优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(35): 65-71.
LU Z G, XIA M Z, ZHANG X H. Carbon capture systems optimal allocation scheme for multi- stage emission reduction planning in power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(35): 65-71.

[16] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修与恢复协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 13-19.
YANG L J, LYU X J, LI D, et al. Coordinated optimization strategy of multi-fault repair and recovery for distribution network with distributed generators[J]. Automation of electric systems, 2016, 40(20): 13-19.

[17] LU Z G, TAO F, LI X P. Low- carbon emission economic power dispatch using the multi- objective bacterial colony chemotaxis optimization algorithm considering carbon capture power plant [J]. Electrical power and energy systems, 2013, 53(1): 106-112.

[18] 虞忠年, 陈星莺, 刘昊, 等. 电力网电能损耗[M]. 北京：中国电力出版社, 2000.
YU Z N, CHEN X Y, LIU H, et al. Power loss in electric power network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

LOW-CARBON POWER SUPPLY PLANNING OF MULTI-TARGET FOR ENERGY EFFICIENCY POWER PLANTS WITH LINE LOSS RATE

Zhang Xiaohui[1], Chen Bing[1], He Yong[1], Yan Pengda[2], Hu Jialin[3], Zhong Jiaqing[1]

(1. *Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province of Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066004, *China*;
2. *State Grid Maintenance Co. of SEPC*, *Taiyuan* 030006, *China*;
3. *SPIC China Power Complete Equipment Co., Ltd.*, *Beijing* 100080, *China*)

Abstract: In order to cope with the serious waste of power generation resources caused by the large consumption of electrical equipment provided by electric power users, and to take into account the potential of demand side resources in the balance between supply and demand, the energy demand side energy efficiency power plant is included in the power supply planning. In this article, considering comprehensively the minimum carbon emissions and the minimum comprehensive cost, a multi-objective power planning model for energy efficiency power plants is established. The line loss rate constraint is increased in the constraint condition. Finally, using the discrete bacterial colony chemotaxis algorithm solve this model. Sensitivity analysis is carried out for different carbon emissions control limitation and line loss rates. With the reduction of carbon emission limit, clean energy unit construction more, with the reduction of line loss rate, the construction of energy efficiency reduction of power plant conclusion. Finally, the simulation results verify the effectiveness of the proposed power planning model.

Keywords: electric power plants; emission control; electric load loss; energy efficiency power plant; discrete bacterial colony chemotaxis algorithm