

# 低碳电力系统的设计与评估

吕睿可

## 1. 低碳电力系统的设计

### 1.1 设计思路

在规划未来的电厂建设时，主要利用的信息包括现有的发电厂情况和对于未来负荷的预测。新建的电厂和现有的各个电厂构成的未来电厂组合，要能适应未来电力系统的安全、稳定、经济、节能、低碳等方面的要求。

对于本次课程设计，可以用于设计的参考信息包括某地区电网 2020 年的负荷预测情况、现有机组及待建电源情况。根据不同的目标，分别可以给出以碳排放最小和建设成本最小为目标的典型的建设方案。在安全和稳定方面，为了简化设计，只考虑年发电量和最大负荷的要求能适应，并且有足够的备用。

### 1.2 方案具体内容

#### 1.2.1 数学建模

**决策变量：** 机组是否修建： $B_j$

$B_j$  为 0-1 变量, 0 表示不修建, 1 表示修建。 $j$  为待建机组序号,  $j=1, 2, \dots, 17$ 。

**目标函数 1：** 系统碳排放最少： $\min \sum_j B_j e_j$

$e_j$  为第  $j$  个机组将会产生的碳排放。为了简化，只考虑火电机组的年最大发电量与发电强度  $E_j$  的乘积。实际规划时，采取优先顺序从高到低为风电、水电、核电、火电的顺序计划。

**目标函数 2：** 系统建设成本最少： $\min \sum_j B_j C_j$

$C_j$  为第  $j$  个待建机组的建设成本，已知。

**约束条件 1：**

年最大发电量约束： $\sum_j PR_j * \text{MaxHours}_j \geq \text{PredictionAnnual} * (1 + 0.1)$

$PR$  为机组容量（已知）。简单起见仍然使用  $j$  作为机组编号，但此时机组包括现有和新建机组。 $\text{MaxHours}$  是机组年最大发电小时数（已知）， $\text{PredictionAnnual}$  为预测的 2020 年发电量，0.1 为年最大发电量的正备用。这

里不考虑负备用。

### 约束条件 2:

最大发电功率约束:  $\sum_j PR_j \geq PredictionMaxPower * (1 + 0.1)$

j 编号仍和上面一样,是所有机组的, PredictionMaxPower 是预测的最大负荷,同样在这里只考虑最大负荷的正备用,不考虑负备用。为了保障安全,这里考虑最大负荷出现在冬季,水电最大出力为容量的 60%,并且不考虑风电。

### 1.2.2 使用优化模型求解 (见代码 Plan.m 和 PlanDitan.m)

使用MATLAB优化,选择CPLEX优化器,设置'verbose'=2,将上述的两种目标函数分别带入,得到两种规划方案如下:

方案1: 以碳排放最小为目标函数:

新建电厂名称	容量 (万千瓦)	年最大利用小时数 (小时)	建设投资 (亿元)
<b>1. 水电装机</b>	<b>650</b>	3000	
HP-0A	50		25
HP-0B	200		190
HP-0C	200		200
HP-0D	200		180
<b>2. 火电装机</b>	<b>530</b>	6000	
TP-0A	160		50
TP-0F	70		20
TP-0G	70		20
TP-0H	70		25
TP-0I	160		60
<b>3. 新能源装机</b>	<b>120</b>	2000	
WP-0A (风电)	60		40
WP-0B (风电)	60		40
<b>4. 核电装机</b>	<b>150</b>	8000	
NP-0A	150		150
新建总容量	1430	总投资	1000

在方案1下，年最大发电量为1664亿度，最大发电功率（冬季，不考虑风电）为2836万千瓦，总投资1000亿元。

方案2：以建设成本最小为目标函数：

新建电厂名称	容量（万千瓦）	年最大利用小时数（小时）	建设投资（亿元）
<b>火电装机</b>	<b>1100</b>	6000	
TP-0A	160		50
TP-0B	110		40
TP-0C	160		55
TP-0D	70		20
TP-0E	70		20
TP-0F	70		20
TP-0G	70		20
TP-0H	70		25
TP-0I	160		60
TP-0J	160		60
新建总容量	1100	总投资	370

在方案2下，年最大发电量为1661亿度，最大发电功率（冬季，不考虑风电）为2806万千瓦。实际上只修建了火电厂。总投资370亿元。

## 2 低碳电力系统的评估

### 2.1 机组出力优化

假设2020年计划修建的电厂就已经投入使用，并且和现在已有的电厂一起参与电力调度。由于缺少发电成本的数据，这里选择低碳运行方式，在满足约束条件的情况下，各机组按照优先性从高到低：风电、水电、核电、火电的顺序出力。

#### 2.1.1 数学建模

**决策变量：**

机组发电出力： $P_j^t$

机组启停状态变量:  $I_j^t$

机组启停状态变量:  $U_{U,j}^t, U_{D,j}^t$

$j$  为所有机组序号, 包括现有机组和按计划新建的机组。 $t$  为小时序数。

**目标函数:** 系统碳排放最少:  $\min \sum_t \sum_j e_{t,j}$

$e_{t,j}$  为第  $j$  个机组在  $t$  时产生的碳排放。为了简化, 只考虑火电机组的年发电量与发电强度  $E_j$  的乘积, 并且按照冬季 185 天, 夏季 180 天安排。实际规划时, 采取优先顺序从高到低为风电、水电、核电、火电的顺序调度发电。

**约束条件 1:**

负荷平衡约束:  $\sum_j P_j^t = TypicalLoad^t$

$TypicalLoad$  为典型负荷, 分为冬季和夏季两种情况, 且随时间  $t$  变化 (已知)。

**约束条件 2:**

系统备用约束: 
$$\begin{cases} \sum_j I_j^t P_j^{max} \geq TypicalLoad^t * (1 + 0.1) \\ \sum_j I_j^t P_j^{min} \leq TypicalLoad^t * (1 - 0.1) \end{cases}$$

其中机组的最大和最小出力限制具体为: 夏季 (丰水期) 水电最大出力可达装机容量的 100%, 冬季 (枯水期) 水电出力只能达到装机容量的 60%。核电一经投产, 出力不得低于装机容量的 90%。火电机组的最小出力, 统一设为其额定容量的 50%。不考虑风电对备用的影响。不考虑线路潮流约束。

**约束条件 3:**

年最大发电量约束:  $\sum_t \sum_j P_j^t \leq PR_j * MaxHours_j$

$PR$  为机组容量 (已知)  $MaxHours$  是机组年最大发电小时数 (已知)。按照冬季 185 天, 夏季 180 天计算。

**约束条件 4:**

机组出力约束:  $I_j^t P_j^{min} \leq P_j^t \leq I_j^t P_j^{max}$

除了约束条件 2 中所述外, 风电的最大出力由该电网 2020 年的冬夏两季典型风电的出力特性给出。

**约束条件 5：**火电机组爬坡约束：

$$\begin{cases} P_j^t - P_j^{t-1} + I_j^{t-1}(P_j^{min} - \Delta P_{U,j}) + I_j^t(P_j^{max} - P_j^{min}) \leq P_j^{max} \\ P_j^{t-1} - P_j^t + I_j^t(P_j^{min} - \Delta P_{D,j}) + I_j^{t-1}(P_j^{max} - P_j^{min}) \leq P_j^{max} \end{cases}$$

其中 $\Delta P_{U,j}$ ,  $\Delta P_{D,j}$ 分别为火电机组上、下爬坡约束,均按机组容量的 20%考虑。

j 为火电机组对应的序号。

**约束条件 6：**火电启停约束：包括机组启停状态变量与机组启停指示变量关联约束、机组最小启停时间约束、机组最大启停次数约束，与课件中参考方法一致，详细见代码，这里不再一一列出。

需要说明的是，这里将一天中 0 点到 6 点的出力作为 23 点后的出力，即机组出力以 24 小时为周期循环。并且不考虑冬夏之交的情况。

一天中火电机组最大启停次数都考虑为 3 次。火电机组的最小开停机时间认为相同，按照任务书中参考给定如下：

火电机组容量 (MW)	100 及以下	100-200	200 及以上
最小开停机时间 (h)	3	6	12

### 2.1.2 使用优化模型求解（见代码 Dispatch\_Qiting.m）

使用MATLAB优化，选择CPLEX优化器，设置‘**verbose**’=2，将上述的两种规划方案分别带入，得到冬季和夏季典型负荷下，每个小时各个机组的出力，填入典型日机组出力序列表格中。

## 2.2 不同电源规划方案优缺点的评述

### 2.2.1 电源修建概况

由 1 中的规划结果可以看出，如果以碳排放最小为目标函数，在此例中又不考虑水电和风电等机组的边际碳排放，因此得出的规划中水电和风电的比例很大（实际上将全部的待建水电、风电机组全部修建），可再生能源比例达到可行的最大,缺点是成本太高，而且装机容量有些过多。

然而，一方面，水电和风电的年发电小时分别只有 3000 和 2000 小时，相对火电的 6000 年最大发电小时明显很低，因此为了满足年发电量的约束，需要更

多的装机容量。

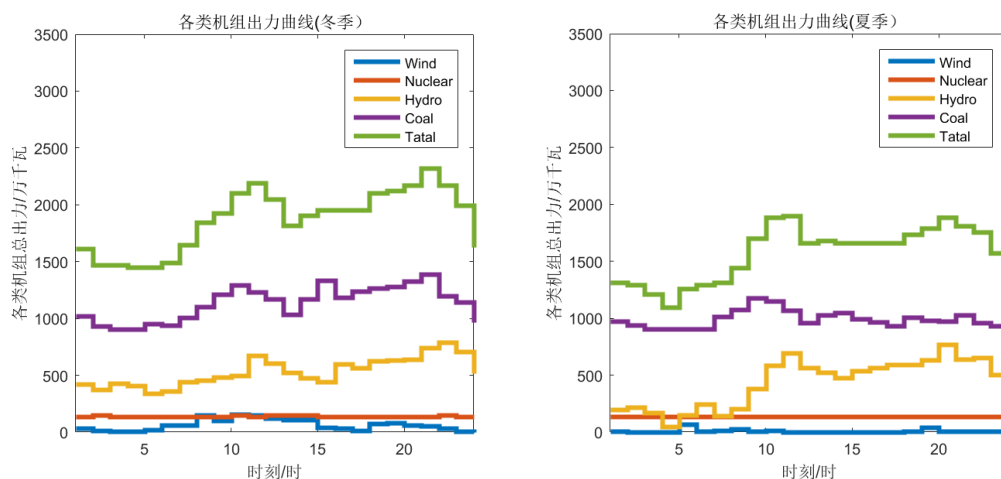
另一方面，水电在冬季时最大出力仅有装机容量的 60%，风电由于其出力的随机性和装机容量相对较小，计算备用时不予考虑，因此水电和风电装机对系统最大备用的贡献相对火电是不足的。

以上年发电量和最大发电功率及备用这两方面约束，实际上就是本次课程设计中考虑的全部电源规划约束。因此在电源规划时，可以发现，若以碳排放最小为目标函数，新建的总装机容量达到了 1430 万千瓦，而如果以修建成本最小为目标函数，新建总装机容量为 1000 万千瓦。再加上水电和风电的单位容量修建成本比火电高很多，导致前一种方案的修建成本远远高出了后一种。

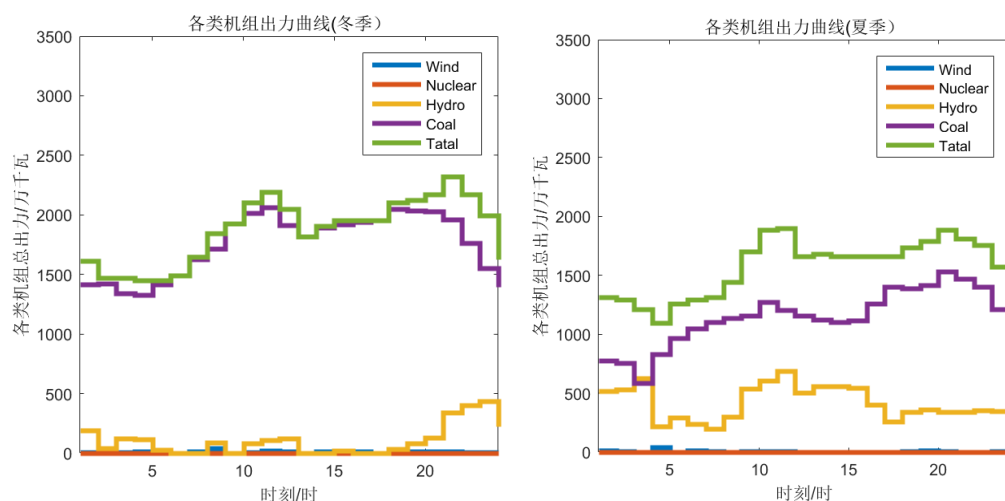
### 2.2.2 各机组出力情况

根据以上优化模型得出的出力，分别绘制两种电源规划下，面对冬季和夏季典型负荷时的各类机组出力情况如下：

#### ①以系统碳排放最少为目标的规划下



#### ②以修建成本最少为目标的规划下



直观上可以看出，以修建成本最少为目标的规划下，火电机组的出力比重始终很大，而水电等清洁能源不仅装机容量小，而且出力比例也更小。下面进一步计算一些相关的指标。

### 2.2.3 各机组的年发电小时

用各机组的年发电量除以装机容量，得到其年发电小时。由于在建模中没有考虑同类机组之间的差异，因此这里也将同类机组的出力以容量为权重加权平均列在表中。各机组的年发电小时如下：

建设方案	碳排放最少	修建成本最低
风电	2000	2000
水电	3000	3000
核电	8000	无核电
火电	5257	5310

和之前所谓“直观”的认识有所不同，在两种规划下，系统都实现了风电、水电、核电的年发电小时最大化，原因是现行的约束还是相对宽裕，没有很好体现新能源良好的出力调节。

可以发现，在以碳排放最少为目标的修建方案中，火电的平均年发电小时相对低一些，这和我我国新能源装机比例大的地区火电年发电小时低的现状是吻合的。

### 2.2.4 火电机组的启停情况

火电的发电成本和其启停情况有较大关系。虽然这里没有考虑发电成本，但是可以计算火电机组的启停次数。为了简化模型，只在上述处理优化模型的目标函数中加入启停成本，以实现启停最小化。即目标函数变为

$$\text{目标函数: } \min\{\text{CarbonPrice}\sum_t\sum_j e_{t,j} + \text{QitingPrice}\sum_t\sum_j (U_{U,j}^t + U_{D,j}^t)\}$$

其中CarbonPrice为碳价。QitingPrice为启停花费，简单起见所有火电机组启停成本设为1，远小于碳价，以降低对火电总出力的影响。得到启停次数如下：

建设方案	碳排放最少	修建成本最低
火电启停总次数	119	296

在第一种规划下，火电的启停次数远小于第二种，这主要是由于水电良好的调节性能，使得减少火电的启停次数更可行。

实际上，如果风电装机很大时，也可能造成相反的结果，这里将风电的比例都放大十倍，再次运行程序，得到结果如下：

建设方案（增大风电比例）	碳排放最少	修建成本最低
火电启停总次数	158	287

第一种电源规划方案下，风电装机容量本来就大，增大风电比例后火电机组的最小启停次数明显上升，而第二种规划方案下变化不大。

### 2.2.5 火电机组的出力成本

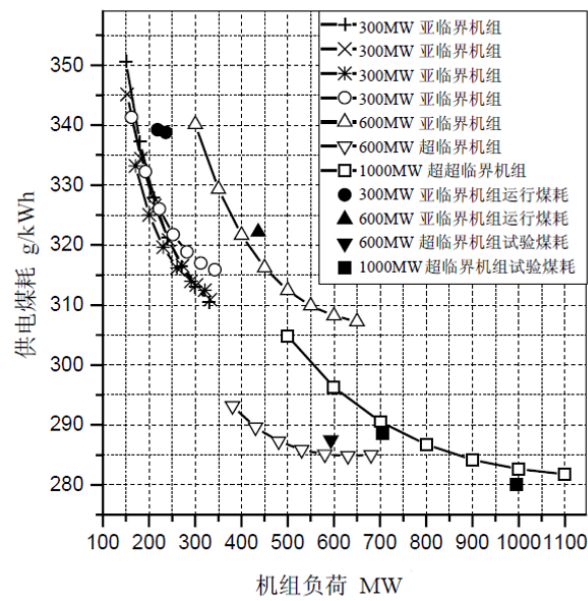
在上述处理优化模型的目标函数中考虑火电出力对成本的影响，以实现火电成本最小化。即目标函数变为

$$\text{目标函数: } \min\{\text{CarbonPrice}\sum_t\sum_j e_{t,j} + \sum_t\sum_j P_j^t \text{CoalPrice} (P_j^t)\}$$

其中CoalPrice是与火电出力有关的发电成本，简单起见，取为火电装机容量



量的倒数。这样，装机容量越大的机组优先出力，比较符合实际。



在两种情况下，火电出力的平均成本情况如下：（已归一化，方法为，除以成本中较大者）

建设方案	碳排放最少	修建成本最低
火电出力平均成本	0.948	1.00

本例中以碳排放最少为目标的电源规划方案下，火电平均成本更低。这主要是因为水电良好的出力调节性能，电力调度时可以将火电机组的出力优化。

2.1.4 系统碳排放情况

根据出力情况，火电碳排放强度按照 0.8kgCO<sub>2</sub>/kWh计算，两种电源规划下的碳排放相关指标如下：

建设方案	碳排放最少	修建成本最低
火电年发电量（亿千瓦时）	931	1270
碳排放量（吨）	7448	10160
综合碳排放强度kgCO <sub>2</sub> /kWh	0.50	0.67

本次设计中，第一种方案的目标就是碳排放最少，因此碳排放强度自然会更低。不过综合碳排放强度的降低并没有容量比例的变化那么大，因为火电的年发电小时更多，总发电量的比例变化被削弱了。

### 3. 对该电网电源规划的发展建议

#### 3.1 综合考虑修建成本和碳成本

如果不考虑现有技术条件的变化,在市场和政府职能完善时,发电的外部成本已经考虑在碳价中,在修建时应该考虑全生命周期收益最大化,因此除了修建成本外,还应该考虑碳成本。

在本次课程设计中,分别以碳排放最少和修建成本最少为目标设计了两个建设方案,但是这两个方案的考虑都不全面,导致了一些问题。

例如,以碳排放最少为目标时,为了满足电网的安全要求,新能源的装机容量很大,造成了一定的浪费(1430 万千瓦对 1000 万千瓦)。而且新能源的成本更高,如果盲目追求碳排放最少,可能导致总成本过高(1000 亿元对 370 亿元)。

而在以修建成本最少为目标时,只建设了一批火电厂,导致在典型日负荷下启停次数很多,而且碳成本太高。而且这显然是不符合提高新能源比例的趋势的。

#### 3.2 考虑电源规划对电力调度的影响

本文简单讨论了两种不同的电源规划下,各机组出力的情况。由于不同电源的出力和发电成本特性不同,电源规划会影响电力调度。

例如,在上面的计算中,第一种电源规划下火电的年发电小时更少,但是可以有更低的平均发电成本和更少的启停次数。

但是从另一方面而言,水电在冬季出力的限制和风电出力的随机性都给系统的安全运行带来了一些不利的影响,也需要综合考虑。

#### 3.3 扩大考虑的时间范围

本次课程设计中,假设电厂 2020 年就能投入运行。实际上,电厂的修建需要时间,技术的发展和各种成本的变化也都在较大的时间尺度下变得更为重要。因此,放远眼光,迎合未来的发展趋势是很重要的。需要考虑的包括技术路线、国家战略等等,虽然在本文中没有考虑,但是对于实际的规划非常重要。

#### 4. 小结

在规划未来的电厂建设时，主要利用现有的发电厂情况和对于未来负荷的预测。新建的电厂和现有的各个电厂构成的未来电厂组合，要综合考虑未来电力系统的安全、稳定、经济、节能、低碳等方面的要求。在建立模型时，安全性要求是底线，体现在优化的约束上；而各种效益是目标函数，对效益的不同追求会有不同的规划和调度方案。

在规划电源时就应该综合考虑经济效应和低碳效应，并充分考虑电源规划对未来电力调度的影响。当然，这些都建立在对于未来的预测比较客观、接近实际的前提下。