

A 题 电源规划

合理的规划是电力系统安全、可靠、经济运行的前提和基础。电力系统规划（power system planning）用以确定电力设备增装的时间、地点和类型等以满足规划年限内的电力需求，并在满足电力系统技术性指标（如：20%备用、 $N-1$ 准则、可靠性等）的前提下使规划电力系统的总费用（包括投资费用、运行费用、停电损失费用等）最小。按照规划对象的不同，电力系统规划可分为电源规划、输电网规划和配电网规划等。本次竞赛中，只涉及电源规划，即不考虑电力系统网络的影响。

电源规划本质上是一个多阶段数学优化问题，常通过线性规划、非线性规划、启发式优化方法（如遗传算法、模拟退火等）等进行求解。请选择合适的方法，解决以下电源规划问题：

问题 1：工程经济分析（只考虑机组投资费用）

对 IEEE-RTS 系统，拟在未来十年增装 10 台附录 4.1 表 2 中的类型 2 机组。现有三种投资方案：

- 1) 在第一年投建全部机组；
- 2) 每年投建一台机组；
- 3) 分别在第一年和最后一年投建 5 台机组。

试比较各方案的经济性。

问题 2：IEEE-RTS 单阶段电源扩展规划（目标函数只考虑机组投资费用）

IEEE-RTS 系统由 32 台发电机组构成，总装机容量 3405MW，峰值负荷 2850MW。以 2019 年为基准年，假设 2030 年系统峰值负荷增长 30%。请规划 2030 年当年增装机组的类型和数量。不考虑机组运行费用和系统停电损失费用。

附录 4.1 给出了该系统原有机组和待增装机组的电气参数、经济性参数等。规划过程中：每小时负荷均取为峰值负荷；发电容量备用率不低于 20%，且满足 $N-1$ 准则（即一台机组停运的条件下仍能满足负荷需求）。

问题 3：IEEE-RTS 单阶段电源扩展规划（目标函数只考虑机组投资费用和运行费用）

（1）附录 4.2 给出了系统典型日负荷信息（相对于峰值负荷的标幺值），峰值负荷 2850MW。请计算典型日第 12 和第 24 小时现有系统各机组的最优负荷分配

方案（不考虑机组启停和爬坡率限制）。

（2）假设问题 2 中，2030 年内每天的负荷标么值同该典型日。在问题 2 的基础上，考虑机组投资费用和系统运行费用，规划 2030 年当年增装机组的类型和数量。

问题 4：IEEE-RTS 单阶段电源扩展规划（目标函数考虑机组投资费用、运行费用和停电损失费用）

（1）考虑典型日负荷，计算现有系统的可靠性指标 LOLP、EENS 和停电损失。单位停电损失设为 10 \$/kWh。

（2）在问题 3 的基础上，考虑机组的投资费用、系统运行费用和停电损失费用。规划 2030 年当年增装机组的类型和数量。

问题 5：IEEE-RTS 多阶段电源扩展规划（目标函数考虑机组投资费用、运行费用和停电损失费用）

以 2019 年为基准年，假设 2020 年-2030 年，年峰值负荷增长率均为 3%。每年每天的负荷标么值同典型日负荷。其它条件同问题 4。要求在停电损失费用计算中尽可能考虑高阶（大于 3 阶）系统故障状态的影响。

（1）规划未来 10 年每一年增装机组的类型和数量。从精度和计算效率的角度说明所选模型、方法的合理性。

（2）考虑可靠性指标约束（ $LOLP \leq 0.5\%$ ），不考虑停电损失费用，规划未来 10 年每一年增装机组的类型和数量。

问题 6：

（1）当规划大量可再生能源（如：风力发电、光伏发电）接入电力系统时，其出力不确定性将对传统电力系统规划带来什么影响？请阐述你的观点和依据。

（2）实际电力系统的元件众多，这对求解非线性约束（如：可靠性等）的电源规划问题带来巨大挑战。试讨论该问题潜在的解决方法。

附录 背景知识及专业术语介绍

附录 1 发电机组投资成本的等年值

资金的价值与时间有密切联系。当前的一笔资金，即使不考虑通货膨胀的因素，也比将来数量相等的资金更有价值，这是因为当前资金可在使用过程中产生利润。

对电源规划，在不同时刻投建发电机组所需的成本及其获得的利润，其价值也不同。为了取得经济上的正确评价，应该把不同时刻的资金折算为同一时刻的资金，然后在相同的时间基础上进行比较。

记一笔资金的当前等效金额（现值）为 P ，未来第 t 年的等效金额（将来值）为 F ，分摊到每一年的等效支付金额（等年值）为 A 。 P 、 F 和 A 的关系如下：

$$\begin{aligned} F &= P \cdot (1+r)^t \\ F &= A \cdot \frac{(1+r)^t - 1}{r} \\ A &= \frac{r(1+r)^N}{(1+r)^N - 1} \cdot P \triangleq CRF \cdot P \end{aligned}$$

其中， r 为贴现率， CRF 为资金回收系数。当 CRF 用于折算机组投资成本时， N 表示机组使用寿命， P 表示机组投资成本现值；当 CRF 用于折算运行成本时， N 表示规划年限 T ， P 表示 T 年内的运行总成本。

各规划年的投资成本现值均取附录 4.1 表 2 中给出的投资成本。

附录 2 发电系统的可靠性评估

发电系统可靠性是发电系统按可接受的质量标准、数量需求不间断地向用户提供电力和电能的能力的度量。

故障率和修复时间是评估发电系统可靠性最主要的可靠性参数。

故障率（failure rate）：元件（在可靠性统计、分析、评估中不需要再细化，且视为整体的一组器件或设备的通称，如：一台机组或一条线路）在单位暴露时间内因故障不能连续执行规定功能的次数，常用 λ 表示。可以按单一元件或某类型元件、单位线路长度、同杆架设线路，或同一走廊线路等分类计算其故障率。如：某电厂发电机故障率 2.5 次/年。

修复时间（repair time）：对元件实施修复所用的实际矫正性维修时间，包括故障定位时间、故障矫正时间和核查时间，常用 r 表示。当修复时间已知时，修复率（常用 μ 表示）为修复时间的倒数，即 $\mu=1/r$ 。如：某电厂发电机修复时间为 87.6 小时/次，则修复率 $\mu=8760/r=100$ (次/年)。

根据元件的故障率 λ 和修复率 μ ，即可计算元件处于正常运行状态的概率 P_A （或称可用率）和处于故障状态的概率 P_U （或称不可用率）： $P_A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$ 、 $P_U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$ 。

若使用一个两状态马尔科夫模型（即 1 表示该元件正常运行，0 表示故障）表示机组状态，则发电系统状态由各个机组状态组成。假设该系统有 M 个元件，系统状态 $s=(s_1, \dots, s_i, \dots, s_M)$ ，其中 s_i 表示第 i 个元件的状态，则使用以下指标评价发电系统可靠性：

(1) (发电系统)失负荷概率，LOLP (loss of load probability)

给定时间区间内系统不能满足负荷需求的概率，即

$$LOLP = \sum_{s \in S} P_s$$

式中， P_s 表示系统处于状态 s 的概率， S 表示给定时间区间内不能满足负荷需求（或造成系统负荷削减）的系统状态全集。系统状态 $s=(s_1, \dots, s_i, \dots, s_M)$ 的概率为： $P_s = P(s_1, s_2, \dots, s_M)$ 。

特别地，当 M 个元件状态相互独立时， $P_s = P(s_1)P(s_2) \dots P(s_M)$ 。 $P(s_i)$ 表示第 i 个原件

处于状态 s_i 的概率，可以用该元件的正常运行概率和故障概率获得，例如： $P(s_i = 1) = P_{Ai}$ 。

(2) 期望失电量，EENS (expected energy not supplied)

系统在给定时间区间内因发电容量短缺造成负荷需求电量削减的期望值，即

$$EENS = T \times \sum_{s \in S} (C_s \times P_s)$$

式中， C_s 表示状态 s 条件下削减的负荷功率。 C_s 可通过比较状态 s 下的可用机组容量与负荷大小得到。

以上指标可用解析法（状态枚举法）得到。以一个简单例子进行说明：

某发电系统有 3 台机组。设 3 台机组 $G1$ 、 $G2$ 和 $G3$ 的装机容量分别为 40MW，30MW 和 90MW；系统负荷假设全年为 80MW（即只有一个负荷水平）；机组的故障率均为 2 次/年、修复时间为 50 小时/年。

每个元件有两个状态，发电机组共有 $2^3=8$ 个状态。其系统状态用 0 表示故障，1 表示运行。

编号	系统状态	系统状态概率	系统状态失负荷/MW	失电量/MWh
1	111	0.96648163	0	0
2	011	0.01103334	0	0
3	101	0.01103334	0	0
4	110	0.01103334	10	966.5207
5	001	0.00012595	0	0
6	010	0.00012595	50	55.16671
7	100	0.00012595	40	44.13336
8	000	0.00000144	80	1.007611

以第 4 个状态为例，其概率计算如下：

$$P_4 = P(s_1 = 1, s_2 = 1, s_3 = 0) = P(s_1 = 1)P(s_2 = 1)P(s_3 = 0)$$

$$\begin{aligned}
 &= A_1 \times A_2 \times U_3 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \times \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \times \frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \mu_3} \\
 &= \frac{8760}{2 + \frac{8760}{50}} \times \frac{8760}{2 + \frac{8760}{50}} \times \frac{2}{2 + \frac{8760}{50}} = 0.01103341
 \end{aligned}$$

该系统的 LOLP 和 EENS 指标：

$$LOLP = P_4 + P_6 + P_7 + P_8 = 0.011033341 + 0.00012595 + 0.00012595 + 0.00000144 = 0.0112866。$$

$$EENS = 966.5207 + 55.16671 + 44.13336 + 1.007611 = 1066.83 \text{ MWh/年}。$$

解析法中，系统状态数随着元件数和负荷水平数的增加而急剧上升，因此可以通过忽略高阶系统故障状态（故障阶数 k 指故障状态中同时有 k 台机组发生故障）、负荷聚类等方法降低计算复杂度。

附录 3 电源规划模型概述

电源规划模型常以规划期内机组投资费用、系统运行费用、停电损失费用等总费用最小为目标，在满足电厂建设约束、系统安全约束、机组运行约束、系统可靠性约束等条件下，优化机组的增装计划。以下模型仅供参考。

（一）目标函数

假设规划期为 T 年， X_t 表示规划年 t 增装的各类型机组， Y 表示现有系统中的机组。则电源规划模型的目标函数为：

$$\min f = \sum_{t=1}^T C_{It}(X_t) + CRF \cdot \sum_{t=1}^T [C_{Ot}(X_1, X_2, \dots, X_t, Y) + C_{Lt}(X_1, X_2, \dots, X_t, Y)]$$

式中，第一部分为机组的等年值投资成本 C_{It} ，第二部分为电厂运行成本 C_{Ot} ，第三部分为停电损失费用（成本） C_{Lt} 。

电厂运行成本 C_{Ot} 模型如下：

$$C_{Ot} = \sum_{\tau=1}^{8760} (a_i P_{i\tau}^2 + b_i P_{i\tau} + c_i)$$

式中， $P_{i\tau}$ 表示第 i 台机组在第 t 个规划年的第 τ 个小时的输出功率；使用二次函数表示机组运行成本与输出功率间的关系， a_i 、 b_i 和 c_i 分别为该函数中的系数。

停电损失成本 C_{Lt} 模型如下：

$$C_{Lt} = EENS_t(X_1, X_2, \dots, X_t, Y) \cdot IEAR$$

式中， $EENS_t$ 表示第 t 规划年的期望失电量（参考附录 3）， $IEAR$ 为单位停电损失。

（二）约束条件

（1）机组增装变量整数约束

显然，机组增装变量 X 为整型变量，即：

$$X \in N$$

（2）年最大投运台数约束

同类机组的年最大投运台数受施工及制造能力限制。

（3）总装机台数约束

规划期间，同类机组的总装机台数不应超过该类机组总装机台数上限。

（4）电量平衡约束

增装机组需要满足未来负荷电量增长的需求。

（5）容量备用约束

相对于最大负荷，发电系统的总可用容量需有一定的裕度。

除以上约束条件外，可能还包括实时电力平衡、最小技术出力、机组爬坡率等约束。

附录 4 IEEE-RTS 系统数据

附录 4.1 IEEE-RTS 机组技术和经济参数

附录 4.2 IEEE-RTS 系统典型日负荷

附录 4.3 IEEE-RTS 机组可靠性参数