

发电容量最优规划的收益/费用算法^{*}

杨 澎 陈少华

(广东工业大学电气工程及自动化系, 广州, 510090)

摘要 介绍了发电容量最优规划的收益/费用算法. 通过比较增加发电容量所需的费用和可靠性提高使停电损失减小所获的收益, 确定增加发电机组的最佳时机.

关键词 可靠性; 综合停电损失函数; 最优规划

中图分类号 TM 715

电力系统的基本任务是可靠而且经济地向用户提供足够的合格电能. 电力系统的可靠性包括两个方面: 系统的安全性和充足性. 系统的安全性表示系统能承受其内部扰动的能力, 而充足性表示系统现有发配电设备的容量能满足用电负荷的能力. 用电负荷增加将使系统可靠性降低, 停电造成的经济损失也随着增加. 因此需进行新的投资来增加发电容量. 何时增加发电容量最经济合理, 是电源规划要解决的问题之一.

一般将复杂的电力系统划分为发电系统(HL1)、发电——输电组合系统(HL2)和发电——输电——配电组合系统(HL3)来进行研究. 本文只涉及发电系统, 即将全部发电机组和负荷连接在同一条母线上的单一节点系统. 以前常用的发电容量规划方法^[1]: 1) 系统的备用容量应大于最大一台机组的容量或为系统负荷的某百分值(如 20%~30%); 2) 系统的电力不足期望值(LOLE)不大于 0.1d/a(如美国和加拿大)、0.3d/a(如欧洲和日本)等. 这些方法都只考虑系统的可靠性, 没有把可靠性与经济性联系起来, 得到的结果往往不是最合理的.

本文介绍的发电容量规划的收益/费用算法, 通过计算增加发电容量所需的费用(如投资、生产费用等)和增加发电容量使停电损失减小所获的收益, 找出当两者相等时所对应的负荷水平, 从而确定增加发电机组的最佳时机. 这种方法同时考虑系统的可靠性和经济性, 明显优于上述的几种方法.

1 用户停电损失的计算

系统可靠性提高的价值(收益)表现为用户停电频率和停电持续时间下降, 使停电损失相应减小. 计算停电损失需建立: 1) 发电容量模型; 2) 负荷模型; 3) 综合停电损失函数(CCDF).

1.1 发电容量模型

一般用停运容量概率表来表示发电容量模型^[1].

设已形成 $n-1$ 台发电机的停运容量概率表, 停运容量为 X 的确切状态概率为 $p_{n-1}(X)$.

* 收稿日期: 1996-10-09

为其负荷构成不变, 可以只考虑停电损失与停电时间的关系. 因此可使用综合停电损失函数. 对于图 1 所示的 IEEE- RBTS 系统^[2], 综合停电损失函数如表 1.

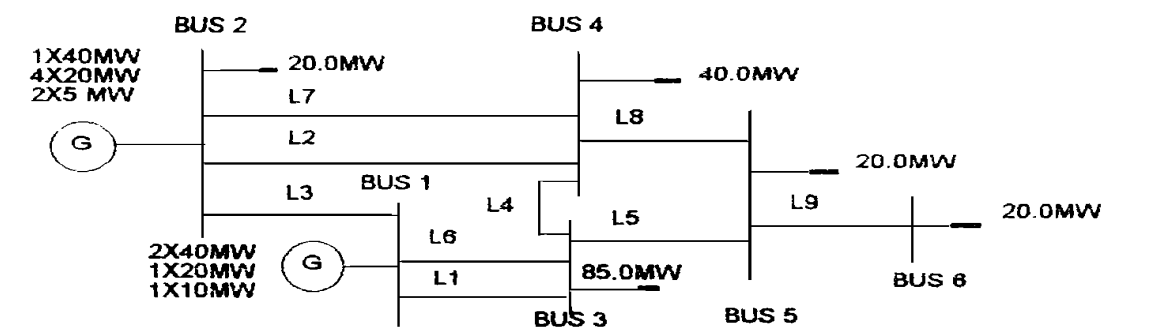


图 1 RBTS 发电—输电组合系统图

根据负荷裕度容量状态的持续时间可从表 1 查出相应的损失率 $c_i(d_i)$ (元/kW). 系统停电损失

$$Ecost = \sum_{i=1}^N m_i f_i c_i(d_i).$$

(10)

2 发电费用

发电费用可分为固定费用和可变费用两部分. 年固定费用主要与装机容量有关, 而与机组是否运行无关, 如资金利息、设备折旧费、保险费等. 可变费用(生产费用)主要包括燃料费和运行费等, 与各台机组的发电量(EES)有关.

由于发电机组停运和负荷出现都具有随机性, 电能生产是一个随机生产过程. 常用等效持续负荷曲线法($ELDC$)来计算各机组的发电量.

先将发电机组按带负荷先后排序, 经济性高的机组优先带负荷, 同时考虑水力机组的调峰作用. 第 i 台机组的发电量 EES_i 可根据等效持续负荷曲线 $f^{(i-1)}(x)$ 来计算:

$$EES_i = T p_i \int_{x_{i-1}}^{x_i} f^{(i-1)}(x) dx, \quad (11)$$

T 为研究周期; p_i 为机组 i 的可用率, $p_i = 1 - q_i$,

$x_i = \sum_{j=1}^i c_j$, c_j 为机组 j 容量.

等效持续负荷曲线的递推公式:

$$f^{(i)}(x) = p f^{(i-1)}(x) + q f^{(i-1)}(x - c_i).$$

(12)

初始等效持续负荷曲线 $f^{(0)}(x)$ 表示系统负荷大于或等于 x 的概率. 第 i 台机组的年可变费用

$$V_i = EES_i \cdot R_i,$$

(13)

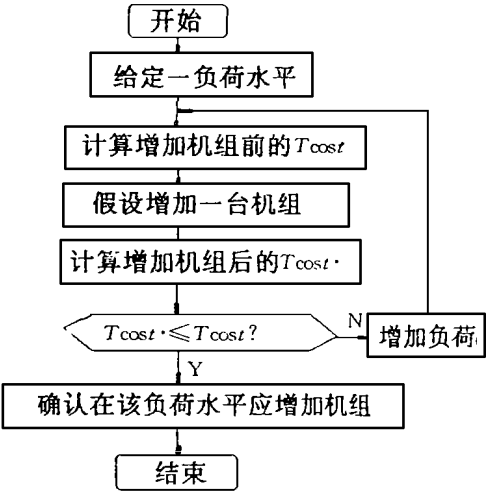


图 2 计算程序主框图

表 2 缺电量 $EENS$ 和停电损失 E_{cost} 随负荷变化的计算结果¹⁾

负荷增加 %	峰荷 (MW)	$EENS$ (MWh/a)	E_{cost} (1000 元/a)	$EENS'$ (MWh/a)	E_{cost}' (1000 元/a)
0.0	185.0	9.9421	35.7916	4.3835	15.8246
2.0	188.7	14.4318	52.9548	6.2621	22.4188
4.0	192.4	23.8641	85.9267	9.2160	32.9012
6.0	196.1	32.4188	115.8078	12.9293	46.5166
8.0	199.8	43.3168	154.9207	17.2883	62.4160
10.0	203.5	59.4297	212.7367	22.2264	80.4997

1) $EENS$ 、 E_{cost} 是增加机组前的结果, $EENS'$ 和 E_{cost}' 是增加机组后的结果.

表 3 发电量 EES 和发电费用 G_{cost} 随负荷变化的计算结果¹⁾

负荷增加 %	峰荷 (MW)	EES (MWh/a)	G_{cost} (1000 元/a)	EES' (MWh/a)	G_{cost}' (1000 元/a)
0.0	185.0	990.9427	8543.2143	990.9483	8591.9821
2.0	188.7	1010.4275	8817.2778	1010.4339	8861.9973
4.0	192.4	1031.1261	9053.1393	1031.1407	9109.8243
6.0	196.1	1051.3210	9292.4728	1051.3405	9345.6715
8.0	199.8	1072.5181	9558.7094	1072.5441	9603.4721
10.0	203.5	1092.1001	9849.2140	1092.1373	9895.5562

1) EES 、 G_{cost} 是增加机组前的结果, EES' 和 G_{cost}' 是增加机组后的结果.

增加机组后的增发电量等于缺电量的减小量.

总费用 T_{cost} 随负荷变化的关系如表 4 和图 5. 因为单位发电成本远小于单位停电损失, 随着负荷增加, 图 4 中的曲线 1 比曲线 2 上升更快. 当负荷增加到它们的交点的对应值 L_{opt} 时, 就应增加发电机组. 从图 4 可以知道, 当负荷增加了 4% 时, 应增加第一台机组.

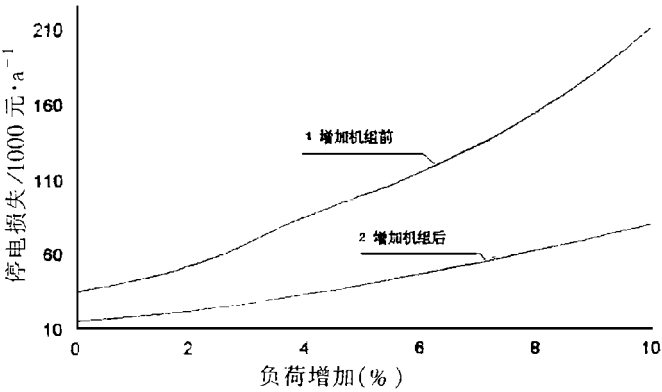


图 4 停电损失与负荷增加的关系

第 n 台机组的容量为 c_n , 故障率 λ_n , 修复率 μ_n , 则其强迫停运率 $q_n = \lambda_n / (\lambda_n + \mu_n)$.

追加第 n 台机组后, 停运容量为 X 的确切状态概率为:

$$p_n(X) = p_{n-1}(X)(1 - q_n) + p_{n-1}(X - c_n)q_n.$$

(1)

确切状态的频率:

$$f_n(X) = p_n(X)(\lambda_n^+(X) + \lambda_n^-(X)),$$

(2)

其中 $\lambda_n^+(X)$ $\lambda_n^-(X)$ 分别为从停运容量 X 向更小和更大停运容量转移的转移率.

$$\lambda_n^+(X) = (p_{n-1}(X)(1 - q_n)\lambda_{n-1}^+(X) + p_{n-1}(X - c_n)q_n(\lambda_{n-1}^+(X - c_n) + \mu_n))/p_n(X),$$

(3)

$$\lambda_n^-(X) = (p_{n-1}(X)(1 - q_n)(\lambda_{n-1}^-(X) + \lambda_n) + p_{n-1}(X - c_n)q_n\lambda_{n-1}^-(X - c_n))/p_n(X).$$

(4)

对于第一台机组, $\lambda_1^+(0) = 0$, $\lambda_1^-(0) = \lambda_1$, $\lambda_1^+(c_1) = \mu_1$, $\lambda_1^-(c_1) = 0$, $p_1(0) = 1 - q_1$,

$$p_1(c_1) = q_1.$$

1.2 负荷模型

采用二级日负荷模型. 峰荷 L_i 出现的概率

$$p(L_i) = (n(L_i)/D)e,$$

(5)

式中 D 为考察期的天数, $n(L_i)$ 为 D 天内 L_i 出现的天数, $D = \sum_{i=1}^N n(L_i)$, N 为峰荷水平个数.

$L_1 > L_2 > L_3 > \dots L_N$. e 为峰值系数, 一般 $e = 0.5$.

第 k 个容量裕度定义为发电可用容量 C_j 与系统负荷 L_i 的差, 即 $m_k = C_j - L_i$. 裕度状态 m_k 的确切状态概率

$$p_k = p(C_j) \cdot p(L_i).$$

(6)

用 λ_{k+} 、 λ_{k-} 分别表示 m_k 向更大或更小的裕度状态转移的转移率, 确切状态频率

$$f_k = p_k(\lambda_{k+} + \lambda_{k-}),$$

(7)

持续时间

$$d_k = p_k/f_k.$$

(8)

负的裕度状态表示出现缺电事故. 系统缺电期望值

$$EENS = \sum_{i=1}^N m f_i d_i \quad (N \text{ 为负容量裕度的个数}).$$

(9)

1.3 综合停电损失函数(CCDF)

用户停电损失包括直接经济损失(如工厂停工损失)、间接经济损失(如停电造成设备损坏对以后生产的影响)、直接社会影响(如造成居民生活不便)和间接社会影响(如造成社会骚乱)等. 用户停电损失主要跟用户的类别(如工业用户、商业用户、农业用户、居民用户等)、停电的时间(如上班时间的停电损失大于其它时间的停电损失)和停电持续时间等因素有关.

用户停电损失函数就是用来表示停电损失

与这些因素之间的关系. 对于不同的地区, 各类负荷所占的比例(即负荷构成)可能不同, 同样的停电造成损失也会不同. 因此应使用分类停电损失函数. 但对一发输电组合系统, 可以认

表 1 IEEE- RBTS 综合停电函数 CCDF (1987 年)

停电持续时间(min)	停电损失(元/ kW)
1	0.67
20	1.56
60	3.85
240	12.14
480	29.41

其中 R_i 为可变费用率(元/MWh), 等于燃料费率与运行费率之和. 用 F_i 表示第 i 台机组年固定费用, 则年发电费用

$$G_{cost} = \sum_{i=1}^N (F_i + V_i), \quad (14)$$

N 为机组台数.

3 发电容量最优规划

式(10)和式(14)中分别计算出停电损失 E_{cost} 和发电费用 G_{cost} . 系统总费用为两者之和, 即

$$T_{cost} = G_{cost} + E_{cost}. \quad (15)$$

对于某一负荷水平, 如果增加机组后的 T_{cost} 正好等于或小于增加机组前的 T_{cost} , 这说明增加机组所获得的效益(停电损失减小)大于或等于所需的费用. 显然这是增加机组的最好时间.

上述的算法框图如图 2~ 3.

使用上述的算法, 通过比较增加不同发电容量所得到的 T_{cost} , 找出最小 T_{cost} 所对应的发电容量, 还可以确定应增加的最佳容量.

4 算例分析

用上述的算法对图 1 所示的 RBTS 系统进行计算. 详细的发电机组、负荷等数据参阅文献[2].

缺电量 $EENS$ 和停电损失 E_{cost} 随负荷变化的关系如表 2 和图 4. 当负荷增加时, $EENS$ 和 E_{cost} 都快速增加. 增加发电容量可以明显减缓缺电量和停电损失增加的速度.

发电费用 G_{cost} 随负荷变化的关系如表 3. 增加一台机组后的发电成本与被增加机组的效益有关. 本例中被增加的机组的煤耗率大于其它机组, 安排于最后带负荷. 如果被增加的机组的煤耗率较小, 应优先安排带负荷.

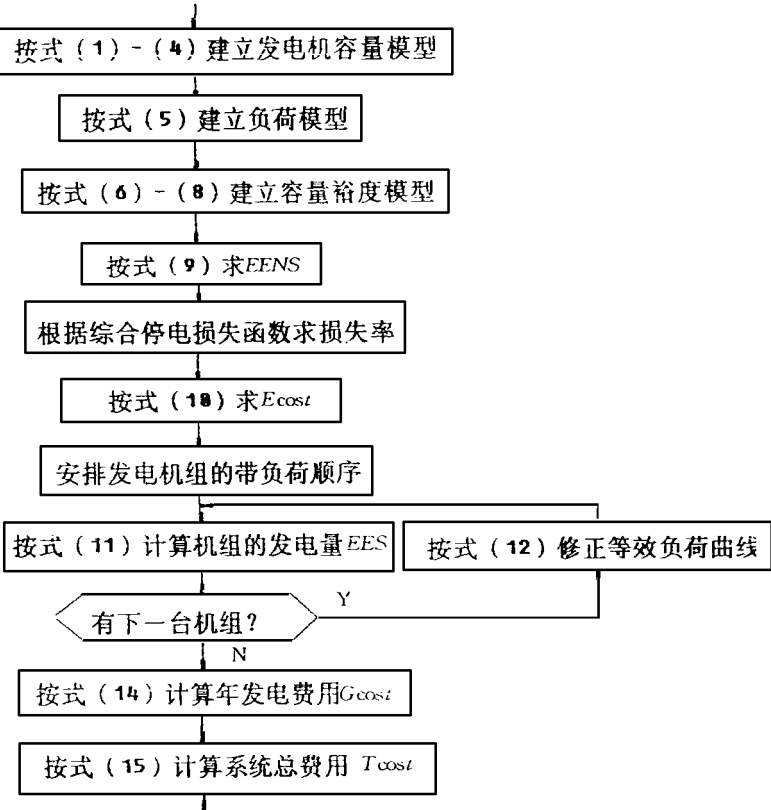


图 3 系统总费用 T_{cost} 计算框图

表 4 总费用 T_{cost} 随负荷变化的计算结果

负荷增加 %	峰荷 (MW)	增加机组前 T_{cost} (1000 元/a)	增加机组后 T_{cost}' (1000 元/a)
0.0	185.0	8579.0059	8607.8067
2.0	188.7	8870.2326	8884.4161
4.0	192.4	9139.0660	9142.7255
6.0	196.1	9408.2826	9392.1881
8.0	199.8	9713.6301	9665.8881
10.0	203.5	10061.9510	9976.0559

5 结论

本文通过综合停电损失函数 (CCDF) 计算用户停电损失, 并用等效持续负荷曲线法 (ELDC) 计算各机组的发电量和系统的发电费用. 当负荷增长使增加机组后的系统总费用恰好等于或小于不增加机组时的总费用时, 就应增加机组以扩大系统的容量. 这种发电容量规划的收益/ 费用方法, 同时考虑系统的可靠性经济性, 明显优于以前只考虑可靠性的发电容量规划方法.

本文的算法只是解决电源规划中何时应增加机组的问题. 如果要解决应在何地增加机组的问题, 就必需考虑输电系统影响. 这涉及到电网规划.

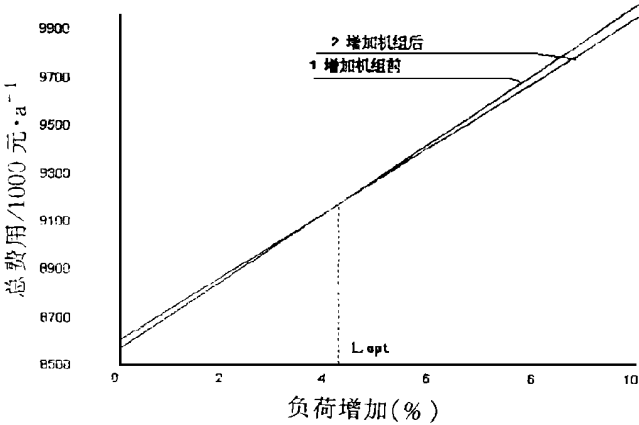


图 5 总费用与负荷增加的关系

参 考 文 献

1 Billiton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power System. Now York: Pitman Press, 1984. 156~ 189

2 Billiton R, Kumar S, Chowdhury N. A Reliability Test System for Educational Purposes– Basic Data. IEEE Transactions on Power System, 1989, 4(3): 1283~ 1243

3 Billiton R, Oteng– Adjei, Ghajar G. Comparison of tow Alternative Methods to Establish an Interrupted Energy Assessment Rate. IEEE T ransaction on Power System, 1987, 2(3): 751~ 757

4 王锡凡, 肖惕, 张启宏. 电力系统最优规划. 北京: 水力电力出版社, 1990. 126~ 129

Cost/ Benefit Approach for Optimal Generation Planning

Yang Peng Chen Shaohua

(Dept. of Electric Engineering and Automation, GDUT, Guangzhou, 510090)

Abstract The cost/benefit approach for optimal generation planning is presented. The optimality condition to add a generating unit is decided by comparing the marginal cost spent to improve service reliability to the benefit obtained.

Key words reliability; composite customer damage function; optimal planning

科研简讯

我校科技工作会议胜利召开

6月2日至4日,我校召开了自组校后的第一次科技工作会议.这次大会的主要任务是制定学校“九五”科技发展规划和科技发展战略;研讨提高我校科技工作水平应采取的策略和措施.

钟韶校长在开幕式上作了《面向广东经济建设,努力提高我校科技工作水平》的主报告.报告阐明科学研究对提高我校办学水平的意义,分析了学校组建两年来科技工作取得的成绩和存在的不足,提出我校科技发展的指导思想和“九五”期间的主要目标以及为实现这些目标应采取的措施.

省高教厅科研处何玉芝处长到会并讲了话.她介绍了兄弟院校在科技工作方面的一些好的经验,并对广东工业大学的科技工作提了几点希望.她说,作为省属工业大学,要摆正位置,大部分学科应走出校门,向企业争取科研经费;要广泛发动和精心组织,要练内功,确保项目的完成;要加强领导和管理,充分发挥科研机构与重点实验室的作用.

开幕式上还表彰了1996年在科技工作中取得突出成绩的教师,并颁发了奖金.

会议的第二天下午是分组讨论.代表们着重讨论了钟校长的主报告和学校“九五”科技发展规划,并对新制定科技管理文件(征求意见稿)提出了许多建设性意见.代表们普遍认为,“规划”是以科学的态度和从我校的实际出发的,提出的目标经过努力是可以达到的,采取的措施是切实可行的;科技管理文件有利于提高我校科技工作水平.

会议闭幕式上,首先是五个系的代表发言,交流各自系的好作法、好经验.他们的发言,既是对过去的总结,更是对未来的期冀.孙友松副校长作了题为《明确目标,落实措施,踏踏实实地把我校科技工作搞上去》的总结报告.孙副校长提出各系(部)要在积极争取纵向科研项目的同时,大力加强横向联系,争取为广东的经济建设多做贡献.孙副校长要求各系(部)在大会以后认真贯彻会议精神,落实行动,为我校科技工作上质量、上水平而努力奋斗.

最后,党委书记区社能同志作了重要讲话.区书记要求全校职工要正确处理教学与科研,科研与科技产业,个人与集体,重点与一般,上级支持与自我发展,管理与服务六大关系,大力推进我校科技工作,把我校办成省委、省政府期望的重点工科大学.

(科研处)