

发电系统可靠性指标及其计算

陈可科¹, 韩如月²

(1. 南京市科学技术局 国际合作处, 江苏 南京 210018;

2. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

[摘要] 发电系统传统地从概率、期望值、频率和持续时间几个指标衡量发电系统的可靠性,即电源充裕度。对发电系统传统可靠性指标及其计算方法进行了分析,并以 IEEE—24RTS 系统为例进行计算,分析影响和改善系统可靠性的因素,以期通过对传统指标和计算方法的剖析,为市场环境下可靠性问题分析提供依据。分析结果表明:可通过采用峰谷分时电价政策或进行合理有效的负荷管理,改变系统的负荷曲线形状,以期达到提高系统可靠性和经济运行的目的。

[关键词] 发电系统可靠性,可靠性指标,解析法,模拟法

[中图分类号] TM712 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1672-1292(2006)02-0013-05

Indices and Calculation of Power Generation System Reliability

CHEN Keke¹, HAN Ruyue²

(1. International Cooperation Division, Nanjing Science and Technology Bureau, Nanjing 210018, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Traditional power generation system reliability indices such as probability index, expectation index, frequency index and duration index are used to evaluate the level of power generation system reliability. This paper analyzes the traditional power generation system reliability indices and the calculation method, and reliability indices of IEEE 24 RTs bus test system are calculated to find the factors affecting or improving reliability. This paper tries to supply references to the problem of reliability on power market conditions. The results show that implementing TOU (time-of-use) pricing policy and load management can improve the system reliability and benefit.

Key words: power generation reliability, reliability indices, analysis, simulation

0 引言

发电系统的可靠性,即电源充裕度,是对系统的发电容量是否满足负荷需要进行判断。在分析中,通常假定输电和配电系统均正常工作,不会导致系统失负荷。

无论在传统的电力系统,还是在解除管制后的市场环境下的电力系统,如何保证充足的电源容量,并使得系统的可靠性和经济性达到最优,都是值得关注的问题。

鉴于此,本文对发电系统传统可靠性指标及其计算方法进行了分析,并以 IEEE—24RTS 系统为例进行计算,分析影响和改善系统可靠性的因素。以期通过对传统指标和计算方法的剖析,为市场环境下可靠性问题分析提供依据。

1 发电系统可靠性指标

发电系统的可靠性指标为可靠性评估提供了定量的尺度,也为电力系统的规划设计提供了决策依据,如依据可靠性准则进行装机容量和备用容量的确定、检修计划的制定等。目前,在国内外研究中最广泛使用的一些指标如下:

缺电时间概率(LOLP, loss of load probability),是研究期间(1天)内可用发电容量不满足负荷需要量

的概率值,即风险度。

缺电时间期望值(LOLE, loss of load expectation),是某个研究期间(例如1周、1年),系统容量小于日最高负荷的天数期望值。

缺电小时期望值(HOLE, hourly loss of load expectation),是把典型日负荷曲线分配到24 h,从而逐小时计算得到的指标,表明的是研究期间(1年)的期望停电小时数。它并不能由LOLE转化得到,因为LOLE在计算时,是假定研究期间各天的日最高负荷持续一天。

电量不足期望值(EENS, expectation energy not supplied),是在研究期间内由于发电设备停运造成负荷停电而少供的电量。以及在一定时期内由于电源不充分而导致的负荷停电的平均次数(LOLF, loss of load frequency)和每次停电的平均持续时间(LOLD, loss of load duration)。

在电力市场环境下,需要有新的衡量可靠性经济性的指标。目前,广受研究者重视的是成本风险指标 C_R 。如果通过统计分析得到1 kWh电量的停电损失费 α ,则成本风险为 $C_R = \alpha \cdot \text{EENS}$ 。

2 发电系统可靠性指标的计算方法

计算发电系统可靠性指标的方法有解析法和模拟法两种^[1,2]。

解析法是通过建立发电系统和负荷的可靠性数学模型,利用数值计算方法求解。这种方法物理概念清晰,易于理解。在给定的简化假设条件下,一般可求得正确的结果,因此得到了广泛的应用。特别是在电源规划中,须考虑机组计划检修,这时要求计算结果较为精确,用解析法就更为合理。但是,当系统增加元件或发生变化时,计算量将呈指数增长。

模拟法虽也使用数学模型,但是它通过在此模型上进行采样试验求得结果,类似通常的统计实验^[3]。模拟法是一种非常灵活的方法,且对于处理某些复杂问题是唯一可行的方法。但由于具有明显的统计性质,计算结果不够精确且费时。

2.1 解析法^[4]

2.1.1 LOLP和F&D法

LOLP和F&D法是一种比较通用的计算电源可靠性的方法,它是根据需要进行计算的几种主要的指标而命名的。应用这种方法分析可靠性时,计算步骤如下:

(1) 建立容量模型:容量模型是考虑系统发电设备随机停运,根据停运容量而形成的系统状态空间模型。具体地讲,就是使停运容量 X 从0开始以一定的步长取值,直到 C_S (系统内所有发电机容量之和),并计算与某一 X 对应的确切概率 $p(X)$,或将所有大于等于 X 的状态组合后形成累积概率 $P(X)$,也即停运容量大于等于 X 的概率。

(2) 建立负荷模型:建立负荷模型是为了表示出全年任一周期时间内(每个季度、每周、每天或每小时)系统负荷及其变化趋势。常用的是按年表次序形成的负荷模型,此外还有两极日负荷模型和累积状态负荷模型。

(3) 计算发电系统可靠性指标:考虑发电机组的检修计划对负荷模型的修正,计算指标。

2.1.2 等值负荷持续曲线法(ELDC)

在某些发电系统的规划中,不需要强调LOLF和LOLD指标,这时应用ELDC法非常简单和灵活。这种方法的最大的特点是不需要分别建立系统的容量模型和负荷模型,而是将这两种模型用一个有效负荷模型来代替,并直接在此模型上求得所需的可靠性指标,计算步骤如下:

(1) 原始的负荷数据形成研究期间的原始负荷持续曲线,如图1中 $P_{L0}(X)$,横坐标表示一周内的负荷,纵坐标表示负荷大于等于某一给定 X 的概率 $P(X)$ 。

(2) 在建立了这一原始的负荷持续曲线后(为简化计算,可用一直线代替,如 $P_L(X)$),考虑发电设备的随机停运,根据递推的卷积公式逐个地追加到原负荷 L 的概率模型中,可形成等值负荷持续曲线 $P_{Le}(X)$,如图1所示。

(3) 计算发电系统可靠性指标。可以看到,等值持续负荷曲线是把发电机组的随机故障影响当成等值负荷对原始持续负荷曲线不断修正的结果。图1中, $P_{Le}(X)$ 为考虑了所有发电机的随机停运后形成的等值负荷持续曲线。显然,当等值负荷大于 C_S (系统内所有发电机容量之和)时,系统的可用发电容量不能满足

负荷需求,故系统的 LOLP 值即为 $P_{Le}(X)$ 曲线上横坐标为 C_S 的点对应的纵坐标。EENS 为 $P_{Le}(X)$ 曲线上从 C_S 到 $L_{max} + C_S$ 的一段与横坐标围成的面积。

2.2 模拟法^[5]

模拟法,也称蒙特卡罗法,是以概率理论和统计方法为基础的一种计算机模拟方法,它用抽样的方法进行状态选择,用统计的方法得到可靠性指标,广泛应用于各种系统的可靠性计算中^[6,7]。计算步骤如下:

(1) 系统状态选择

采样时考虑的不确定因素是发电机的随机故障和节点负荷的随机波动。对于发电机,因认为其是两态元件,利用计算机产生一个服从均匀分布 $U(0,1)$ 的随机数,将此随机数与发电机的故障率(FOR)比较,确定该设备的状态:若此随机数小于发电机的故障率,则认为发电机的状态为故障停运,否则,认为发电机的状态为正常运行。对于负荷,产生一个服从标准正态分布 $N(0,1)$ 的随机数,利用此随机数修正已知的节点负荷预测值。因此,采样确定了研究期间的可用发电容量和负荷需求量。

(2) 统计计算发电系统可靠性指标

抽样确定每天的可用发电容量和负荷需求量之后,即可统计计算 LOLP 和 LOLE 指标:

$$\hat{E}_{LOLP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{LOLP}(x_i) \quad (1)$$

式中, x_i 是第 i 次抽样的状态值; N 是总的状态抽样次数; $F_{LOLP}(x_i)$ 是第 i 次抽样值 x_i 状态下的 LOLP 值;若状态为 C_S 小于修正后的负荷值 \bar{L} ,则系统故障停运, $F_{LOLP}(x_i)$ 取为 1, 否则, $F_{LOLP}(x_i)$ 取为 0。得到每天的 E_{LOLP} 值后,把一周内每天的 E_{LOLP} 相加,则得到了 LOLE 指标。

抽样确定每小时的可用发电容量和负荷需求量之后,即可统计计算 EENS 和 HOLE 指标:

$$\hat{E}_{EENS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_{EENS}(x_i) \quad (2)$$

式中, $F_{EENS}(x_i)$ 是第 i 次抽样值 x_i 状态下电量不能满足负荷的值。如,按照抽样确定的发电机出力总和 C_S 小于修正后的负荷值 \bar{L} ,则 $F_{EENS}(x_i)$ 取为 $\bar{L} - C_S$, $F_{HOLE}(x_i)$ 取为 1, 否则, $F_{EENS}(x_i)$ 和 $F_{HOLE}(x_i)$ 均取为 0。

蒙特卡洛法的计算量(抽样次数)几乎不受系统规模或复杂程度的影响,而且该方法的计算量与估计精度的平方成反比,也就是说,在一定的精度下,减少抽样次数的唯一途径就是减小方差。因此,在实用中,许多文章提出了各种减小方差的技巧,以提高蒙特卡洛法的收敛速度。

3 算例分析

以图 2 所示的 IEEE—24RTS 系统^[8]为例,进行发电系统可靠性指标的计算,计算时暂不考虑机组检修计划的影响。

系统中有 32 台发电机,设备参数选取如表 1 所示。负荷模型为按年表次序形成的模型^[8]。测试系统的年最大负荷为 2 850 MW,利用周最高负荷表(即以年最大负荷的百分数表出),即可计算出每周的最大负荷。同样,利用日最高负荷表可计算得到每日的最高负荷。在计算 HOLE、EENS 等指标时,可利用系统提供的 4 个季节的典型日负荷数据计算得到各日 24 h 的最大负荷。停电损失费用的计算与实际的经济状况有关,且不同负荷的停电损失费用不同。因为这一费用需通过统计分析得

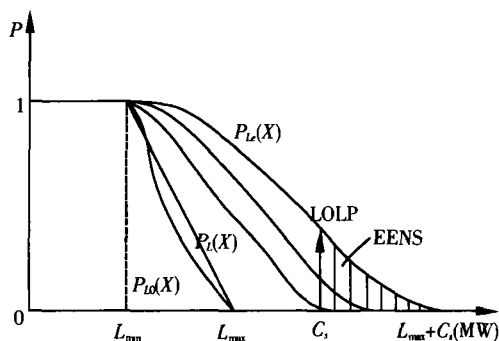


图 1 一周的原负荷模型和有效负荷模型

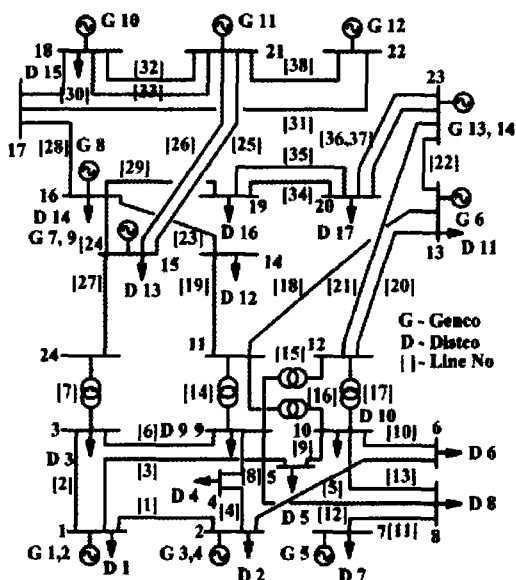


图 2 一周的原负荷模型和有效负荷模型

到,本文为简化计算,假定1 kWh电量的停电损失费用为50元。

首先用LOLP和F&D法编制计算机程序形成发电系统的停运容量模型,计算各指标,计算结果见表2。

表1 发电机设备参数			
容量/MW	台数	FOR(强迫停运率)	修复时间/d
12	5	0.02	2.5
20	4	0.10	2.08
50	6	0.01	0.83
76	4	0.02	1.67
100	3	0.04	2.08
155	4	0.04	1.67
197	3	0.05	2.08
350	1	0.08	4.17
400	2	0.12	6.25

表2 LOLP和F&D法计算的可靠性指标	
指标	指标计算值(1a)
LOLE/(d/a)	1.368 86
HLOLE/(h/a)	9.394 17
EENS/(MWh/a)	1 176.298 46
C _R /(万元/a)	5 881.492 30
LOLF/(次/a)	1.716 30
LOLD/(h/次)	5.473 48

用等值负荷持续曲线法(ELDC)编制程序计算各指标值,结果如表3所示。

用模拟法计算时,实际值偏离预测值的方差 $\sigma^2=0.02$ 。系统状态抽样1万次,方差系数 $\beta<0.002$ 。模拟结果如表4所示。

表3 等值负荷持续曲线法计算的可靠性指标	
指标	指标计算值(1a)
HLOLE/(h/a)	8.237 30
EENS/(MWh/a)	1 043.400 00
C _R /(万元/a)	5 217.000 00

表4 模拟法计算的可靠性指标	
指标	指标计算值(1a)
LOLE/(d/a)	1.400 40
HLOLE/(h/a)	9.500 00
EENS/(MWh/a)	1 177.675 40
C _R /(万元/a)	5 888.377 00

对计算结果进行分析,可以得到以下结论:

(1)从计算过程中可以得到,用3种方法计算各有优缺点。用LOLP和F&D法计算准确,且可全面的计算所有指标,但对于大系统,要逐台增加机组来确定停运容量模型,计算过程将很复杂。模拟法在计算小系统,如本系统时,计算时间较长,其优越性没有体现出来,但在计算大系统时,将比解析法计算快速。此外,对具有随机性和波动性的系统,如风电系统,用模拟法可较为方便地建模、求解。等值负荷持续曲线法(ELDC)比较直观,可直接从等值负荷持续曲线上得到各指标,易于理解,更适用于水电机组比重大的系统进行随机生产模拟,可全面地考虑电量和容量约束。

本文对IEEE—24RTS系统计算得到的指标从概率、期望值和频率及持续时间几个方面反映了发电系统的可靠性,即电源的充裕度。用LOLP和F&D法与用模拟法计算得到的指标结果接近,用等值负荷持续曲线法计算得到的结果与前两种方法有较大的差别,主要是因为前两种方法在计算LOLP时应用的是日负荷模型,认为日最高负荷持续一整天,而等值负荷持续曲线法却是按照小时负荷来形成累积负荷模型。此外,为简化计算,原始负荷曲线中的曲线部分进行了近似。

(2)负荷的变化对可靠性指标有着直接的影响。从图3可以看出,对应于负荷模型中的两个季节性峰荷:出现全年最高负荷的第51周(100%),出现第二个峰荷的第23周(90%),各可靠性指标均分别出现最高值、次高值。同样,对应于第13周(70.4%)和第36周出现的低谷负荷(70.5%),各可靠性指标均达到最小值。

细化到日和小时,也仍然是负荷高时,可靠性较差,如表5所示。

因此,发电系统可靠性并非只有通过增加该地区发电容量才能得到改善,采用峰谷分时电价政策或进行合理有效的负荷管理,都可以改变系统的负荷曲线形状,以达到提高系统可靠性,并使之经济运行的目的。

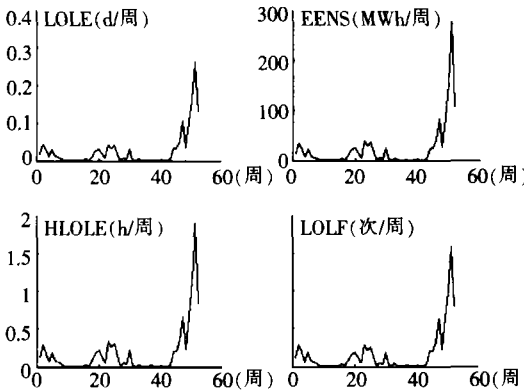


图3 可靠性指标随负荷的变化

(3) 在电力市场环境下,对于各发电公司(如本系统的14个发电公司),也可以中标电量作为负荷预测值,进行自身的发电可靠性评估和成本-效益分析,从而为制定合理的可靠性水平,备用容量的大小和检修计划及互联系统间的容量支援等提供决策和管理的依据.

4 结论

结合 IEEE—24RTS 系统,分别用 LOLP 和 F&D 法、等值负荷持续曲线法(ELDC)和蒙特卡罗模拟法计算了常用的发电系统可靠性指标.可以看出,3种方法各有优劣.市场环境下,还需构建新的指标来反应系统的经济性.从计算过程中也可看到负荷的变化对指标的影响,这些都将是电力市场环境下发电系统可靠性问题的重要研究内容.

表 5 第一周各天的 LOLP

日期	占周负荷的比例	LOLP
周一	0.93	0.001 95
周二	1.00	0.007 49
周三	0.98	0.004 34
周四	0.96	0.003 02
周五	0.94	0.002 35
周六	0.77	0.000 03
周日	0.75	0.000 01

[参考文献] (References)

[1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Yongji. Analysis of Power System Reliability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)

[2] 丘昌涛. 电力系统可靠性[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
QIU Changtao. Power System Reliability[M]. Wuhan: Hua Zhong University of Science and Technology Press, 1992. (in Chinese)

[3] 王秀丽, 陈皓勇, 甘志, 等. 应用随机生产模拟的发电系统可靠性评估方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(17): 15-19.
WANG Xiuli, CHEN Haoyong, GAN Zhi, et al. Reliability evaluation of generation system based on probabilistic production simulation[J]. Electrical Automation of Power Systems, 1999, 23(17): 15-19. (in Chinese)

[4] 杨蔚百. 发电系统可靠性分析原理和方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
YANG Shibai. The Principal and Method of Power Generation System Reliability Analysis[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985. (in Chinese)

[5] 王锡凡, 王秀丽, 陈皓勇. 电力市场基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
WANG Xifan, WANG Xiuli, CHEN Haoyong. Introduction of Power Market[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2003. (in Chinese)

[6] 吴纯义, 丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 70-74.
WU Chunyi, DING Ming. Reliability assessment of wind power generation system based on monte-carlo simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 70-74. (in Chinese)

[7] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
XU Zhongji. Monte-Carlo Method[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985. (in Chinese)

[8] IEEE Reliability Test System. Task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.

[责任编辑: 严海琳]