

含能效电厂的电力系统生产模拟

周景宏¹, 胡兆光², 田建伟³, 肖 潇¹

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京市 102206;

2. 国网能源研究院, 北京市 100052; 3. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 100044)

摘要: 随着各地能效电厂建设的全面展开, 在进行电力规划或电力系统运行分析时, 应考虑能效电厂带来的影响。文中简要介绍了利用等效电量函数法进行电力系统随机生产模拟的原理, 同时, 阐述了能效电厂的概念, 重点介绍了能效电厂的容量、分类、出力曲线、成本费用等相关概念, 以及各类能效电厂参与电力系统生产模拟时的处理方法和能效电厂参与电力系统生产模拟的计算流程, 并通过算例对电力系统中引入能效电厂的影响进行了定量分析和计算。

关键词: 能效电厂; 随机生产模拟; 等效电量函数

0 引言

电力需求侧管理(DSM)作为国家能源战略的重要组成部分, 建立了把需求侧节约的能源作为供应方的一种可替代资源的新理念。能效电厂(EPP)作为 DSM 的一个创新模式, 可以在提高电能使用效率和减少用户电力消耗需求的同时, 达到与建设电厂和相应的输配电系统同样的目的, 是实施 DSM 与实现节能减排的一种有效和直观的途径, 不仅有利于政府解决电力短缺和能源可持续利用的问题, 更有利于企业降低成本、承担社会责任和提高竞争力。由于 EPP 在中国的建设将逐步展开, 有必要在电源优化或电力系统运行分析中考虑 EPP 的影响, 因此, 在进行电力系统生产模拟时也应引入 EPP。

电力系统随机生产模拟是一种通过优化发电机组的生产情况, 考虑机组的随机故障及电力负荷的随机性, 从而计算出最优运行方式下各电厂的发电量、系统生产成本及系统可靠性指标的算法, 它广泛应用于电力系统电源规划、运行规划以及可靠性评估等方面^[1]。目前, 国内外学者提出的随机生产模拟算法主要有分段直线逼近法^[2]、分块法^[3]、序列运算法^[4]、半不变量法^[5-6]及等效电量函数法^[7-9]等。

本文提出了 EPP 参与电力系统随机生产模拟的处理方法, 并利用等效电量函数法, 对算例进行了定量分析和计算。

1 等效电量函数法的基本原理^[9-10]

如图 1 所示, $t=F(x)$ 为研究周期 T 内系统的

负荷持续曲线, P_{Lmax} 表示系统最大负荷, (x', t') 表示系统负荷不小于 x' 的持续时间为 t' 。将横轴 x 按 Δx 分段, 定义一个离散的等效电量函数:

$$E(k) = T \int_x^{x+\Delta x} F(x) dx \quad (1)$$

式中: $E(k)$ 为 $x \sim x+\Delta x$ 这一段负荷曲线对应的负荷电量; $k = \langle x/\Delta x \rangle + 1$; $\langle x/\Delta x \rangle$ 表示不大于 $x/\Delta x$ 的整数。

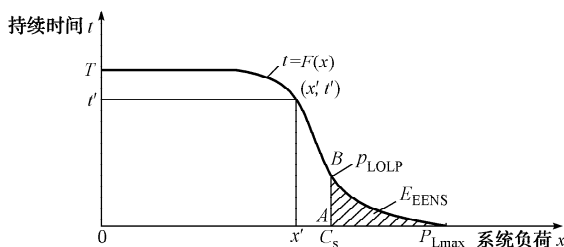


图 1 负荷持续曲线
Fig. 1 Load duration curve

为了考虑发电机组的停运因素, 需要用发电机组随机停运的影响来修正等效电量函数。设原始持续负荷曲线为 $F^{(0)}(x)$, 对应的等效电量函数为 $E^{(0)}(x)$, 在安排完第 $i-1$ 台发电机组运行后得到等效持续负荷曲线 $F^{(i-1)}(x)$, 对应的等效电量函数为 $E^{(i-1)}(x)$ 。设第 i 台发电机组的装机容量为 C_i , 强迫停运率为 q_i , 则安排第 i 台发电机组运行后的等效电量函数为:

$$E^{(i)}(k) = p_i E^{(i-1)}(k) + q_i E^{(i-1)}(k - m_i) \quad (2)$$

式中: $p_i = 1 - q_i$; $m_i = C_i/\Delta x$ 。

第 i 台发电机组的发电量 E_{Gi} 应根据等效电量函数 $E^{(i-1)}(k)$ 来进行计算:

$$E_{Gi} = p_i \sum_{k=k_{i-1}+1}^{k_i} E^{(i-1)}(k) \quad (3)$$

式中: $k_{i-1} = x_{i-1} / \Delta x$; $k_i = (x_{i-1} + C_i) / \Delta x$ 。

如果发电机组全部安排完毕,则随机生产模拟过程结束,进而统计系统总运行成本并进行可靠性指标的计算。假设系统中共有 n 台发电机组,总容量为 C_s ,当全部发电机组卷积运算结束后,等效电量函数为 $E^{(n)}(k)$ 。这时,系统电量不足期望值 E_{EENS} 和失负荷概率 p_{LOLP} 为:

$$E_{\text{EENS}} = \sum_{k > k_n} E^{(n)}(k) \quad (4)$$

$$p_{\text{LOLP}} \approx \frac{E^{(n)}(k_n) + E^{(n)}(k_n + 1)}{2T\Delta x} \quad (5)$$

2 EPP 的相关概念

2.1 EPP 的概念^[11-13]

EPP 是指通过采用高效用电设备和产品、优化用电方式等途径,形成某个地区、行业或企业节电改造计划的一揽子行动方案,达到与新建电厂相同的目的,将减少的需求视同“虚拟电厂”提供的电力电量,实现能源节约和污染物减排。EPP 概念形象地描绘了 DSM 项目的作用,简化了供应侧资源和需求侧资源的选择与比较,使得具有成本优势的 DSM 项目更容易被纳入选择范围。与实际新建电厂相比,EPP 是在原供电系统中进行电能优化而获得的,不再额外占用土地、消耗煤炭等资源,具有巨大的社会效益和经济效益。

2.2 EPP 的容量

EPP 的容量与常规发电机组的容量不同,根据所指向的内容不同,EPP 的容量可分为理论容量和削峰容量。其中,EPP 的理论容量 C_1 是指实施 EPP 项目所节约的电力负荷的理想容量,即完成同样功效的常规用电设备与节能设备的功率差;EPP 的削峰容量 C_x 指 EPP 节约的高峰负荷容量。削峰容量与理论容量的关系如下: $C_x = \alpha C_1$,其中 α 为节能设备高峰时的运行同时率,取值在 0~1 之间。

2.3 EPP 的分类

为了便于进行生产模拟,将 EPP 按运行方式分为 3 种:①确定性 EPP,是指 EPP 中各设备的运行情况均是确定的,即设备的负荷曲线是确定的,该类 EPP 多见于企业中连续运转的能效设备或具有规律性运转的能效设备;②随机性 EPP,是指 EPP 中各节能设备的运行具有随机性,即设备的负荷曲线具有随机性;③移峰类 EPP,是指 EPP 各设备在负荷高峰时不运行,包括移峰填谷类和可中断负荷类。其中,移峰填谷类 EPP 仅在负荷低谷期运行,该类 EPP 的负荷也具有一定的随机性;可中断负荷类 EPP 最大负荷削减量可看做是它的削峰容量,其出

力可按常规机组的方法考虑。

移峰填谷类 EPP 一般在负荷高峰时不运行,仅在低谷时运行,且低谷运行时的负荷可能要大于被替代设备的用电负荷,总用电量大于被替代设备的用电量。对单个运行设备,相关电量计算过程如下:

1) 移峰设备的用电量为:

$$E_y = \int_0^T P_y(t) dt \quad (6)$$

式中: $P_y(t)$ 为移峰设备的运行负荷曲线。

2) 被替代的常规设备的用电量为:

$$E_c = \int_0^T P_c(t) dt \quad (7)$$

式中: $P_c(t)$ 为常规设备的运行负荷曲线。

3) 多耗电量为:

$$\Delta E = (1 - \mu) E_y \quad (8)$$

式中: $\mu = E_c / E_y$,为折算系数,在 0~1 之间取值,主要影响因素为能源转换效率、能源损耗等。

2.4 EPP 的出力曲线

2.4.1 EPP 出力曲线的概念

EPP 的出力曲线是指被替代设备汇总的用电负荷曲线与组成 EPP 的各节能设备汇总的用电负荷曲线之差。一般 EPP 出力曲线按下式计算:

$$P(t) = \alpha_i (P_c - P_j) = \alpha_i P_c - \alpha_i P_j = P_c(t) - P_j(t) \quad (9)$$

式中: α_i 为 EPP 中各节能设备在各负荷点的运行同时率; P_c 为被各节能设备替代的常规设备的总功率; P_j 为 EPP 中各节能设备的总功率; $P_c(t)$ 为被各节能设备替代的常规设备的汇总用电负荷曲线; $P_j(t)$ 为 EPP 中各节能设备的汇总用电负荷曲线。

对于节能设备替代系数相同的 EPP,其出力曲线可按下式计算:

$$P(t) = \alpha_i (P_c - P_j) = \alpha_i (\lambda - 1) P_j \quad (10)$$

式中: $\lambda = P_c / P_j$,为节能设备的替代系数。

对已知节能设备负荷曲线的情况有:

$$P(t) = P_c(t) - P_j(t) = (\lambda - 1) P_j(t) \quad (11)$$

2.4.2 EPP 出力曲线的监测方法

对于确定性 EPP,其能效设备负荷曲线是已知的,在已知 EPP 各设备负荷曲线 $P_j(t)$ 和对对应替代系数 λ 的情况下,可按式(11)计算 EPP 的出力曲线。

对于随机性 EPP,可以将有相同开停概率分布的节能设备归为一类,然后,监测该类设备在各负荷点能效设备的运行同时率 α_i ,再根据各设备的替代系数,按式(10)计算 EPP 的出力曲线。计算该类 EPP 的出力曲线,关键是监测各负荷点能效设备的运行同时率 α_i 。需要说明的是,在监测时,不需要将

能效设备单独拿出来监测,只需监测该类设备的整体即可,这里隐含着完成同样任务的能效设备与常规设备具有相同运行概率的假设。由于该类 EPP 的设备运行具有随机性,在运行时,众多节能设备组成的 EPP 的理论容量大于削峰容量。

在移峰类 EPP 中,移峰填谷类 EPP 的出力曲线可按随机性 EPP 出力曲线的计算方式计算;可中断负荷类 EPP 可以按常规电厂的方式处理。

2.5 EPP 的成本费用

EPP 的投资成本按完成同样效果的节能设备与常规设备的差价来计算。当然,这个成本是从整体上考虑的,从政府或电力公司的角度看,只要补贴企业这个差价的一定百分比就可以促使 EPP 的建设,这时的投资成本将会更低。运行费用为节能设备与常规设备维护和人工费用的差值。

3 EPP 参与生产模拟的处理方式

3.1 相关说明与简化处理

1)EPP 不考虑强迫停运概率。EPP 在进行生产模拟时,由于 EPP 强迫停运时,用电负荷也会相应下降,并不会造成电力供应负荷的短缺。因此,EPP 在进行生产模拟时一般不考虑强迫停运概率。

2)运行费用为节能设备与常规设备维护和人工费用的差值,这里将 EPP 运行费用看做为 0。

3)EPP 投入假设:EPP 实质是用节能设备来替代常规设备,因此,一旦投入即认为是不可逆的。除可中断负荷类 EPP 外,假定 EPP 一旦投入运行,便不可退出。

3.2 生产模拟的处理方法

由于 EPP 在电力需求侧,而常规电厂在电力供应侧,进行生产模拟时,EPP 的出力曲线应利用供、用电之间的损耗系数进行修正。以下提到 EPP 出力曲线,均指经过损耗系数修正的出力曲线。

在具体处理时,首先将确定性 EPP 和随机性 EPP 的出力曲线从原始时序负荷曲线中减去。移峰填谷类 EPP,可按随机性 EPP 的处理方式将其出力曲线从时序负荷曲线中直接减去,其多耗电量可按式(8)计算。可中断负荷类 EPP 的投入认为是可逆的,因此可按停运概率为 0 的常规机组考虑。其他常规机组按正常的等效电量函数法生产模拟方法处理。

4 EPP 参与生产模拟的计算流程

采用等效电量函数法对含 EPP 的电力系统进行随机生产模拟,其流程如图 2 所示。

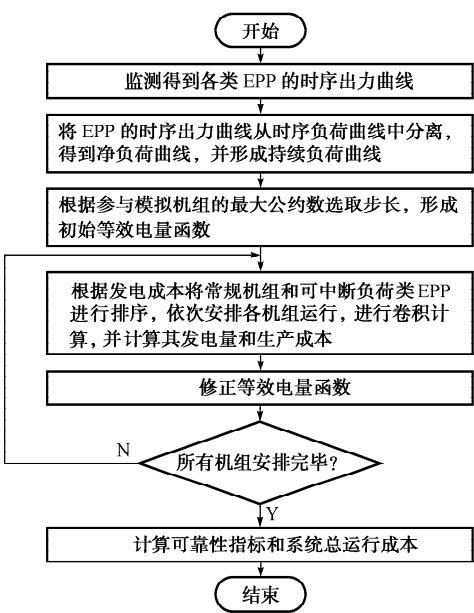


图 2 含 EPP 的电力系统随机生产模拟流程
Fig. 2 Flow chart of power system probabilistic production simulation including EPP

5 算例分析

本文算例中考虑确定性、随机性和移峰填谷 3 类 EPP,其中确定性 EPP 为工业用连续运转的高效电动机,随机性 EPP 为高效家电,移峰填谷类 EPP 为办公蓄热工程和可中断负荷措施,其中,办公蓄热工程负荷高峰时段为 08:00—21:00,其他时段视为低谷时段,2 个时段的理论容量有所不同;可中断负荷按常规电厂的方式处理,其实施成本为 150 美元/(MW·h)。EPP 各时段的运行同时率设定参见表 1,3 类 EPP 的容量设定参见表 2。

表 1 EPP 的同时率设定
Table 1 Setting coincidence factor of EPP

时段/ h	同时率			时段/ h	同时率		
	工业用高效 电动机	高效 家电	办公蓄 热工程		工业用高效 电动机	高效 家电	办公蓄 热工程
0	1	0.2	0.8	12	1	0.5	0.5
1	1	0.1	0.8	13	1	0.4	0.4
2	1	0.1	0.8	14	1	0.4	0.4
3	1	0.2	0.8	15	1	0.5	0.5
4	1	0.3	0.8	16	1	0.6	0.6
5	1	0.4	0.7	17	1	0.7	0.7
6	1	0.4	0.7	18	1	0.7	0.7
7	1	0.5	0.7	19	1	0.6	0.6
8	1	0.6	0.6	20	1	0.4	0.4
9	1	0.6	0.6	21	1	0.3	0.3
10	1	0.6	0.6	22	1	0.3	0.7
11	1	0.5	0.5	23	1	0.2	0.8

表 2 EPP 的容量设定
Table 2 Setting capacity of EPP

序号	类型	实施项目	理论容量/MW
1	确定性	工业用高效电动机	80
2	随机性	高效家电	100
3	移峰填谷类	办公蓄热工程	100(峰段) -120(谷段)
4	移峰填谷类	可中断负荷	40

表 3 18 机组系统发电机组数据
Table 3 Generator units data of 18-unit system

序号	类型	容量/ MW	台数	强迫 停运率	燃料费用/ (美元·(MW·h) ⁻¹)	运行维护成本	
						固定成本/ (美元·(kW·a) ⁻¹)	可变成本/ (美元·(MW·h) ⁻¹)
1	核电	400	2	0.12	6.0	5.0	0.30
2	燃煤机组	350	6	0.08	11.4	4.5	0.70
3	燃油机组	100	4	0.04	23.0	8.5	0.80
4	燃气机组	20	6	0.10	43.5	0.3	5.00

表 4 随机生产模拟结果
Table 4 Probabilistic production simulation result

场景	$E_{\text{EENS}}/$ (MW·h)	$p_{\text{LOLP}}/$ (%)	总燃料费用/ 美元	总固定运行成本/ 美元	总可变运行成本/ 美元	总运行维护费用/ 美元
1	2 622.580 5	2.015 4	13 538 210	1 298 923	791 154	15 628 287
2	1 520.169 7	0.672 4	12 513 005	1 298 923	762 040	14 573 968

注：场景 1 表示系统中没有实施 EPP 项目的原有场景；场景 2 表示系统中实施 EPP 后的场景。

由表 4 可看出：实施 EPP 项目后的 E_{EENS} 由原系统的 2 623 MW·h 减少到 1 520 MW·h，降低了 42%；失负荷概率 p_{LOLP} 由原系统的 2.015 4% 减少到了 0.672 4%，系统可靠性得到了显著的提高；系统总的运行维护费用也有所下降。

6 结语

本文提出了 EPP 的一些相关概念，并对其进行了相应的阐述。通过分析 EPP 运行对电力负荷的影响，提出了 EPP 参与电力系统生产模拟的方法。最后，通过算例对含有 EPP 项目的电力系统进行了随机生产模拟计算，结果说明了含有 EPP 的系统可靠性能够得到显著提高，电力系统中总的生产运行费用也有明显下降。系统可靠性的提高，一方面说明了在保证系统可靠性不变的情况下，EPP 的建设能够延缓常规电厂的建设；另一方面系统电量不足期望值大幅降低，减少了社会缺电成本。总成本费用的下降说明恰当地实施 EPP 项目，也会带来较为可观的经济效益。由于 EPP 项目的实施，节约了供应侧的电力电量，从而使得环境得到了改善。另外，EPP 项目的实施也使得电力系统的负荷率得到了提高，优化了电网的负荷特性。

参 考 文 献

[1] 王锡凡,王秀丽. 随机生产模拟及其应用. 电力系统自动化,

常规机组采用 18 机组发电系统,装机容量为 3 420 MW。发电机组的参数和带负荷顺序如表 3 所示。负荷曲线采用 IEEE RTS 负荷数据^[14],年最大负荷为 2 850 MW,模拟时间为冬季第 49 星期到第 52 星期,共 672 h,机组可靠性和成本数据取自文献[14]。算例对实施 EPP 项目前后的 2 个场景进行了随机生产模拟,结果见表 4。

2003,27(8):10-15.
WANG Xifan, WANG Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 10-15.
[2] BOOTH R R. Power system simulation model based on probability analysis. IEEE Trans on Power Systems, 1972, 91(1): 62-69.
[3] SCHENK K F, MISRA R B, VASSOS S, et al. A new method for the evaluating of expected energy generation and loss of probability. IEEE Trans on Power Systems, 1984, 103(2): 294-303.
[4] 康重庆,白利超,夏清,等. 多节点系统的随机生产模拟新算法. 电力系统自动化,2004,28(7):10-15.
KANG Chongqing, BAI Lichao, XIA Qing, et al. A novel algorithm for multi-area power system probabilistic production simulation. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 10-15.
[5] RAU N S, TOY P, SCHENK K F. Expected energy production costs by the method of moments. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(5): 1908-1917.
[6] STREMEL J P, JENKINS R T, BABB R A, et al. Production costing using the cumulant method of representing the equivalent load curve. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(5): 1947-1956.
[7] WANG X. Equivalent energy function approach to power system probabilistic modeling. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(3): 823-829.
[8] 冯长有,王锡凡,别朝红,等. 考虑机组故障的系统机组检修计划模型. 电力系统自动化,2009,33(13):32-40.
FENG Changyou, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. A

- generator maintenance scheduling model considering unexpected unit failures. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(13): 32-40.
- [9] 王锡凡. 电力系统随机生产模拟的等效电量函数法. *西安交通大学学报*, 1984, 18(6): 13-26.
WANG Xifan. EEF approach to power system probabilistic modeling. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1984, 18(6): 13-26.
- [10] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟. *中国电机工程学报*, 2009, 29(28): 34-39.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(28): 34-39.
- [11] 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. *电力系统自动化*, 2010, 34(11): 19-22.
ZHOU Jinghong, HU Zhaoguang, TIAN Jianwei, et al. A power integrated resource strategic planning model and its application. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(11): 19-22.
- [12] 胡兆光. 综合资源战略规划概述. *电力需求侧管理*, 2008, 10(2): 1-4.
HU Zhaoguang. Brief introduction of integrated resources strategy planning. *Power Demand Side Management*, 2008, 10(2): 1-4.
- [13] 胡兆光, 韩新阳. 综合资源战略规划与需求侧管理: 理论方法与实践. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [14] The Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. *IEEE reliability test system*. *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 1979, 98(4): 2047-2054

周景宏(1976—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 电力规划与电力经济. E-mail: lnly1976@163.com

胡兆光(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统分析、规划及电力市场。

田建伟(1977—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 智能工程在电力系统中的应用。

Power System Production Simulation Including Efficiency Power Plant

ZHOU Jinghong¹, HU Zhaoguang², TIAN Jianwei³, XIAO Xiao¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 100052, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the all-round development of efficiency power plants (EPPs), in the process of electric power system planning or operation analysis, the impact of EPP should be taken into account. This paper presents a brief description of the basic theory of the equivalent energy function method for probabilistic production simulation of a power system. At the same time, a more complete exposition of EPP is made that focuses on the capacity, classification, output curves, cost and other related concepts of EPP. This paper also proposes the approach of a variety of EPPs involved in power system production simulation and the calculation process of EPP involved in the power system production simulation. Finally, the impact of the introduction of EPP is analyzed and quantitatively calculated with an example.

This work is supported by Energy Foundation of U.S. (No. G-0601-08211).

Key words: efficiency power plant (EPP); probabilistic production simulation; equivalent energy function