

基于发电系统可靠性分析的能效电厂有效容量确定

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: 考虑到能效电厂的运行具有随机性,能效电厂出力不能简单地用常规设备与节能设备的容量差来计算,而应通过监测能效电厂的运行情况得到能效电厂的出力曲线。文中采用解析法来计算发电系统可靠性,将监测到的能效电厂的出力曲线从负荷曲线中分离,将分离后的净负荷曲线与常规电厂的停运概率表相结合计算发电系统的可靠性指标,同时,利用电力不足期望值与年最大负荷的关系计算能效电厂在发电系统中的有效容量,并通过算例说明了该思路的实现方式。

关键词: 能效电厂; 发电系统可靠性; 有效容量; 节能

0 引言

电力需求侧管理(DSM)是国际上倡导和推行的一种先进的资源规划方法和管理技术,是指通过采取有效的激励措施,引导电力用户改变用电方式,提高终端用电效率,优化资源配置,改善和保护环境,实现最小成本电力服务所进行的用电管理活动。然而,DSM项目具有量大面广、较为分散的特点,尤其是一些小项目不易运作,其效益也不易测算,需要将一些相关的项目进行归类、汇总成能效电厂(EPP),以便于管理。EPP是一种虚拟的电厂,即通过引导和激励电力用户采用高效的用电设备、优化用电方式等途径,形成某个地区、行业或企业的一揽子DSM计划,在提高电能使用效率和减少用户电力需求的同时,达到与建设常规电厂同样的目的。将减少的电力需求视同“虚拟电厂”提供的电力电量,实现能源的节约和污染物的减排^[1-4]。

发电系统可靠性是评估统一并网运行的全部发电机组按可接收标准及期望数量来满足电力系统负荷的电力和电量需求的能力^[5-6]。随着EPP在中国建设的逐步展开,如何评估EPP对电力系统可靠性的贡献,如何确定EPP在系统中的有效容量,对于EPP项目的选择、电力系统的建设和生产计划的安排都具有十分重要的意义。目前,电力系统可靠性的研究方法有解析法和模拟法^[7-9]。本文采用解析法计算发电系统可靠性,提出了考虑EPP的发电系统可靠性的处理方法。为了使电力公司能够选

择出对电力系统贡献较大的EPP作为实施对象,本文提出了EPP有效容量的概念和计算方法。

1 可靠性计算中 EPP 出力的确定

完成同样功效的常规用电设备与节能设备的功率差称为EPP的理论容量。例如:工业企业中利用20 W的节能灯替代同等光效100 W的白炽灯,则每安装一盏节能灯的理论容量为80 W,当然,EPP是由许多节能措施组成,一般计算理论容量时可按节能改造前设备的总功率减去节能改造后设备的总功率来计算,就是实施EPP项目所节约的电力负荷的理想容量。EPP的本质是一系列DSM项目的汇总,实施EPP项目可以有效减少电力需求,提供可靠的负荷削减量,这个削减量可以等同于一个常规发电厂出力。在计算可靠性的过程中需要确定EPP的出力,但由于EPP的运行具有随机性,因此,EPP的出力不能简单地用理论容量来计算,而应通过监测EPP的运行情况得到EPP的出力曲线。

EPP的出力曲线就是指在实施EPP项目中被替代设备的汇总用电负荷曲线与采用的各节能设备的汇总用电负荷曲线之差^[1]。EPP的出力曲线实际上就是采用节能设备后系统的负荷降低曲线。一般EPP出力曲线可按以下方法计算:

$$P(t)=\alpha_i(P_c-P_j)=\alpha_iP_c-\alpha_iP_j=P_c(t)-P_j(t)$$

(1)

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-P_j 为EPP的理论容量, P_c 为EPP中被替代的常规设备的总功率, P_j 为EPP中新安装的节能设备的总功率; $P_c(t)-P_j(t)$ 为负荷降低曲线, $P_c(t)$ 为被EPP中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

收稿日期: 2010-06-04; 修回日期: 2010-12-28。
美国能源基金会资助项目(G-0601-08211);教育部人文社科基金资助项目(10YJC790360)。

总用电负荷曲线。

理论上,在一定的已知条件下,EPP 出力曲线可由式(1)计算出来。在实践中,国外有些机构在不同的行业、地区、季节、建筑物等条件下监测终端用电设备的运行情况,测算其节电效果与负荷降低曲线,并将其标准化,以便测量与核证类似的能效项目;而在国内,EPP 出力曲线的获取主要采取用户调查的方式,目前,有些科研机构的 DSM 信息采集中,已经加入了用户用电设备的负荷数据,也有些科研机构已经开展了对个别用户的用电设备进行实时能效监测的工作,并积累了一定的数据。随着智能电网建设的逐步实施,智能电表将能够对用户的各种用电信息进行实时采集,那时 EPP 出力曲线的获取也将更加容易。按照 EPP 运行方式的不同,EPP 的出力曲线可分为 3 类。

1)确定性 EPP 的出力曲线。该类 EPP 多见于企业中功率较大且连续运转或具有规律性运转的能效设备,其出力曲线的计算如下:

$$P(t) = P_c(t) - P_j(t) = (\lambda - 1)P_j(t) \quad (2)$$

式中: $\lambda = P_c/P_j$,为节能设备的替代系数。

计算出 EPP 中每个设备的出力曲线后便可汇总形成该类 EPP 的出力曲线。

2)随机性 EPP 的出力曲线。该类 EPP 一般由功率较小且数量较多的能效设备组成,或者由功率较大但其运行具有随机性的能效设备组成。对该类 EPP,可以将具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的运行同时率 α_i 。可按下式计算 EPP 的出力曲线:

$$P(t) = \alpha_i(P_c - P_j) \quad (3)$$

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:

$$P(t) = \alpha_i(\lambda - 1)P_j \quad (4)$$

监测 α_i 是计算该类 EPP 出力曲线的关键,监测时,只需监测该类设备的整体,而无需单独监测能效设备,这里隐含了完成同样功效的能效设备与常规设备具有相同运行概率的假设。

3)移峰类 EPP 的出力曲线。该类 EPP 包括移峰填谷类设备和可中断负荷措施:移峰填谷类设备在负荷高峰时不运行,其出力曲线可按随机性 EPP 的监测方式进行监测;可中断负荷类 EPP 的出力直接削减高峰时的负荷量,其出力认为可调节。

2 发电系统可靠性分析及 EPP 有效容量计算

计算发电系统可靠性一般要建立发电机组的可靠性模型和负荷模型,然后,再按照一定的计算方法

计算相应的可靠性指标。

2.1 发电机组模型^[10-12]与负荷模型

所谓发电机组的可靠性模型是指一台或多台发电机组各种容量状态的概率表。

假设发电系统中有 A 机组和 B 机组,2 台发电机组相互独立,则这 2 台机组并联的累积概率可直接由卷积之和得出,即

$$p(X_k) = \sum_{j=0}^{N_b} p_a(X_k - X_j)(p_b(X_j) - p_b(X_{j+1})) \quad (5)$$

式中: $p_a(X_i)$ 和 $p_b(X_j)$ 分别为发电机组 A 和 B 的累积概率; $i=0,1,\dots,N_a$; $j=0,1,\dots,N_b$; N_a 和 N_b 分别为发电机组 A 和 B 停运容量的离散个数; $p(X_k)$ 为发电机组 A 和 B 并联后的累积概率。

电力系统往往有多台发电机组的类型相同,类型相同的发电机组的停运容量概率按以下方式计算。若同类型机组总数为 n ,其强迫停运率均为 r ,则其中 k 台机组同时停运的概率为:

$$p_k = C_n^k r^k (1-r)^{n-k} \quad (6)$$

式中: C_n^k 为从 n 中取 k 的组合符号。

实际电力系统中往往有类型相同的发电机组,也有类型不同的发电机组,在计算发电机组停运容量概率表时,首先,由式(6)计算出相同类型机组的停运容量概率表,然后,再按式(5)将各类型的发电机组逐一进行并联运算,直至所有机组都计算完毕后,形成最终的机组停运容量概率表。

为计算含有 EPP 的发电系统可靠性指标,负荷采用所研究期间的日尖峰负荷,并将监测出的各类 EPP 出力曲线从原负荷曲线中分离得到净负荷曲线,形成负荷模型。

2.2 发电系统可靠性分析^[10-12]

发电系统可靠性指标,通常是指由于发电机组故障而导致对用户减少供电的一种量度。本文主要采用电力不足期望值(LOLE)和电量不足期望值(EENS)指标。采用解析法对含 EPP 的发电系统进行可靠性分析,其流程如图 1 所示。

2.3 EPP 有效容量的计算

当电力系统的负荷增长后,为保证有同样的可靠性要求,系统的备用容量必然要增加,这就把新增发电机组的额定容量分为 2 个部分:一部分用于供应负荷;另一部分用于增加备用容量。一般将新增机组中可用于供应负荷的这部分容量称为发电机组的有效容量。借鉴常规发电机组有效容量的概念,将 EPP 削减电力系统负荷的能力称为 EPP 的有效容量,EPP 的有效容量可以用来衡量 EPP 对系统可靠性的贡献。在电网企业作为 EPP 实施主体的情

况下,电力公司应选择那些对电力系统可靠性贡献大的能效项目优先实施,而 EPP 的理论容量并不能代表其对电力系统可靠性的贡献,因此有必要计算 EPP 的有效容量。



图 1 含 EPP 的发电系统可靠性计算流程
Fig. 1 Flow chart of power generation system reliability calculation including EPP

常规机组的有效容量一般是按迦弗尔公式来计算,然而,利用迦弗尔公式计算机组有效容量的基本假定是负荷曲线的形状不发生变化,而在计算含有 EPP 的发电系统可靠性时,采用修正负荷曲线的方法改变了负荷曲线的形状,因此,只能根据加入 EPP 后,LOLE 与年最大负荷关系曲线的变化情况判断 EPP 的有效容量。

在可靠性分析中,一般假定负荷曲线的形状不变,负荷的增长按原曲线的比例增长。当运行机组不变时,随着负荷的增长,可以计算出不同负荷水平下的 LOLE 数值,就可得出 LOLE 值与年最大负荷的关系曲线,如图 2 所示。

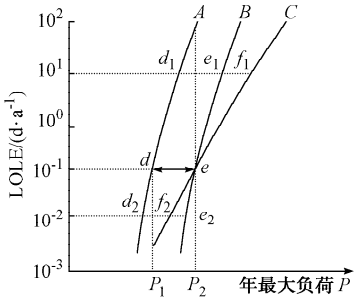


图 2 LOLE 与年最大负荷关系曲线
Fig. 2 Curve of LOLE and year peak load

在发电系统现有运行机组不变情况下得到一条 LOLE 与年最大负荷的关系曲线 A,当年最大负荷由 P_1 增大到 P_2 时,LOLE 指标由 10^{-1} 上升到 90 左右;当发电系统中增加一定容量的常规发电机组时,又会形成一条 LOLE 与年最大负荷的关系曲线

B,按照前文假设,此时负荷曲线的形状没有改变,2 条曲线的距离 de 即为新加入机组的有效容量。

然而,当系统中加入 EPP 后,系统的负荷曲线形状发生了变化,假设在原系统中加入 EPP 后形成一条 LOLE 与年最大负荷的关系曲线 C。从图 2 可以看出,当 LOLE 的值等于 10^{-1} 时,该 EPP 的有效容量为 de 的长度,此时新增 EPP 与新增常规电厂的有效容量相等;当 LOLE 的值等于 10 时,该 EPP 的有效容量为 d_1f_1 的长度,此时新增 EPP 的有效容量要大于新增常规电厂的有效容量 d_1e_1 ;当 LOLE 的值等于 10^{-2} 时,该 EPP 的有效容量为 d_2f_2 的长度,此时新增 EPP 的有效容量要小于新增常规电厂的有效容量 d_2e_2 。从图 2 可以看出,在系统要求不同的 LOLE 值的情况下,EPP 的有效容量不同。当然,图 2 中的关系曲线 C 只是一般形式的假设曲线,在实际计算中,关系曲线 C 会根据加入的 EPP 的出力情况不同而呈现不同的形状。

3 算例分析

本文在算例中考虑了确定性和随机性 2 类 EPP 的情况,其中确定性 EPP 由工业用有规律性运转的高效电动机组成,随机性 EPP 分别由商业用节能灯和高效家用电器组成。各 EPP 容量设定情况参见表 1,EPP 各时段的运行同时率设定参见表 2。

表 1 EPP 理论容量的设定
Tab. 1 Theoretical capacity setting of EPP

序号	类型	能效项目	理论容量/MW
1	确定性 EPP	工业用高效电动机	100
2	随机性 EPP	高效家用电器	80
3	随机性 EPP	商业用节能灯	120

表 2 EPP 同时率的设定
Tab. 2 Coincidence factor setting of EPP

时间	运行同时率		
	工业用高效电动机	高效家用电器	商业用节能灯
星期一	0.80	0.60	0.70
星期二	0.80	0.70	0.80
星期三	0.80	0.70	0.75
星期四	0.80	0.60	0.65
星期五	0.80	0.55	0.65
星期六	0.75	0.75	0.40
星期日	0.75	0.75	0.30

常规机组采用 IEEE-RTS 32 机组发电系统,装机容量为 3 405 MW。发电系统中各机组的容量及强迫停运概率等参数见文献[13]。该系统的负荷曲线采用 IEEE-RTS 负荷数据,年最大负荷为 2 850 MW^[13],计算时间为 1 a,共 364 d。算例共对 3 个场景进行了计算,场景 1 表示在计算过程中没

有考虑 EPP 影响的情况;场景 2 表示在计算过程中按 EPP 的出力曲线修正负荷的处理方式来考虑 EPP 的影响;场景 3 表示在计算过程中按 EPP 的理论容量修正负荷的处理方式考虑 EPP 的影响。

在场景 2 中,利用 LOLE 与年最大负荷关系曲线分别计算每个 EPP 的有效容量。设定最小变化单位为 10 MW,根据变化后的年最大负荷值计算相应的 LOLE 指标,形成 LOLE 与年最大负荷关系曲线。利用这种方法分别计算含有 EPP 的发电系统和不含 EPP 的发电系统 2 条曲线,比较 2 条曲线即可得出 EPP 的有效容量。由于计算过程中设定了最小变动单位,因此,在计算设定点的 LOLE 指标时采用线性差值的方法计算。

表 3 给出了 3 种场景下可靠性指标的计算结果。可以看出,实施 EPP 项目后的 LOLE 值由原系统的 1.368 9 d/a 降到了场景 2 的 0.262 6 d/a, EENS 由原系统的约 4 362 MW·h 减少到了场景 2 的约 2 331 MW·h,系统可靠性得到了显著提高。场景 3 由于采用理论容量修正负荷曲线,即认为所有能效设备都是不间断运行的,因此,场景 3 计算的系统可靠性指标均好于场景 2,但忽略了用电设备运行的随机性,所以用理论容量直接计算 EPP 对电力系统的影响往往夸大了其对电力系统的贡献程度。

表 3 可靠性指标计算结果
Tab. 3 Result of reliability index calculation

场景	LOLE/(d·a ⁻¹)	EENS/(MW·h)
1	1.368 9	4 361.799 0
2	0.262 6	2 331.167 0
3	0.133 0	348.559 5

表 4 给出了场景 2 中 3 个 EPP 的有效容量计算结果,计算过程是按表 1 的顺序逐一加入 3 个 EPP 的方式。由表 4 可以看出,EPP 的有效容量与 LOLE 指标有关,在系统可靠性要求较高时,EPP 的有效容量相对较小,随着系统可靠性要求降低,EPP 的有效容量有较小的增加。从算例可以得出,EPP 的有效容量与 EPP 出力曲线、系统负荷曲线、系统发电机组的停运概率表和设定的可靠性指标有关。

表 4 EPP 有效容量计算结果
Tab. 4 Result of effective capacity of EPP

EPP	各 LOLE 指标下的有效容量/MW			
	0.1	1	5	10
工业用高效电动机	89.870	92.036	92.036	96.641
高效家用电器	58.790	58.368	59.778	61.118
商业用节能灯	95.595	98.331	99.394	102.264

4 结语

本文通过分析 EPP 运行对电力负荷的影响,提出了含有 EPP 的发电系统可靠性的计算方法和 EPP 有效容量的计算方法。最后,通过算例对含有 EPP 项目的发电系统进行了可靠性和 EPP 有效容量的计算,结果说明含有 EPP 的系统其可靠性得到了显著提高。EPP 对发电系统可靠性的贡献一方面体现在削减高峰负荷,另一方面体现在改变负荷曲线的形状使得整个发电系统的可靠性得到提高。

本文在研究发电系统可靠性时,采用的是单母线模型的假设,在实际电力系统中,EPP 的出力是在需求侧,而常规电厂的出力是在供应侧,因此,EPP 对整个电力系统可靠性的贡献将会更大。电网企业可以通过 EPP 在系统中有效容量的计算,选择对电力系统可靠性贡献较大的 EPP 项目实施,EPP 有效容量也可作为电网企业节约负荷量的考核指标。此外,DSM 信息的采集、节电量的标准化、设备负荷曲线的标准化等工作还需要进一步研究,这些工作将对 EPP 出力曲线计算提供数据支持,以便更好地评估 EPP 对电力系统可靠性的影响。

参考文献

[1] 周景宏,胡兆光,田建伟,等.含能效电厂的电力系统生产模拟[J].电力系统自动化,2010,34(18):27-31.
ZHOU Jinghong, HU Zhaoguang, TIAN Jianwei, et al. Power system production simulation including efficiency power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 27-31.

[2] 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[J].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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 19-22.

[3] 胡兆光.综合资源战略规划概述[J].电力需求侧管理,2008,10(2):1-4.
HU Zhaoguang. Brief introduction of integrated resources strategy planning[J]. Power Demand Side Management, 2008, 10(2): 1-4.

[4] 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[M].北京:中国电力出版社,2008.

[5] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.

[6] 郭永基.电力系统及电力设备的可靠性[J].电力系统自动化,2001,25(17):53-56.
GUO Yongji. Reliability of power systems and power equipment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 53-56.

[7] 丁明,李生虎.可靠性计算中加快蒙特卡罗仿真收敛速度的方法

- [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 16-20.
- DING Ming, LI Shenghu. Method for speeding up convergence of Monte-Carlo simulation in reliability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(12): 16-20.
- [8] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 68-75.
- BIE Zhaohong, WANG Xifan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75.
- [9] 唐岚, 束洪春, 于继来. 影响充裕度指标的元件排序方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 12-16.
- TANG Lan, SHU Hongchun, YU Jilai. A method of elements ranking contribution to adequacy indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 12-16.
- [10] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [11] 蒋本一. 电力系统规划[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1993.
- [12] 王锡凡, 孙启宏. 统一频率及持续时间法研究电力系统可靠性[J]. 西安交通大学学报, 1983, 17(1): 1-12.
- WANG Xifan, SUN Qihong. A unified frequency and duration approach to power system reliability studies[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1983, 17(1): 1-12.
- [13] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. 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。

Effective Capacity Determination of Efficiency Power Plant Based on Generation System Reliability Analysis

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: As the operation of efficiency power plant (EPP) is random, therefore, the output of EPP cannot be calculated simply with the capacity difference between conventional equipment and energy-saving equipment. Rather, the output curve of an EPP is obtained by monitoring its operation. The analytical method is used to calculate the reliability of power systems. First the output curve monitored by the EPP is separated from the load curve. Then the power system reliability indices are calculated by the net load curve after the separation and outage table of the conventional power plant. Meanwhile, by use of the relationship between loss of load expectation and annual peak load, the effective capacity of EPP in the power generation system is calculated. The way the above-mentioned idea is illustrated with an example.

This work is supported by Energy Foundation of U. S. (No. G-0601-08211) and Humanities and Social Science Foundation of the Ministry of Education of China (No. 10YJC790360).

Key words: efficiency power plant (EPP); power generation system reliability; effective capacity; energy-saving

书 讯

《变电站电气二次回路及抗干扰》

由景敏慧编写的《变电站电气二次回路及抗干扰》一书,已于2010年12月由中国电力出版社出版、发行,并列选“国家电网公司电力科技著作出版基金”。该书主要介绍变电站的二次回路及相应的抗干扰措施等内容,全书共分3篇,即电流、电压互感器,变电站的二次回路,以及变电站二次回路抗干扰。作为长期从事继电保护工作的经验总结,该书同时介绍了由于违反GB/T 14285—2006《继电保护和安全自动装置技术规程》而造成故障的资料和故障录波图,并进行了分析论证。全书共19章,45万字,书中理论与实际相结合,讲述原理深入浅出,图文并茂,通俗易懂。该书可供从事变电站二次回路工作的基建、运行、维护人员和继电保护工作者参考使用,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。