实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究

蔡德华[1]，陈柏熹[2]，程乐峰[2]，王利国[1]，余 涛[2]

(1.江门供电局，广东 江门 529030；2.华南理工大学电力学院，广东 广州 510640)

摘要：实施需求侧管理可以提高能源利用率，减少最大负荷需求量，相当于间接增加了系统的发电容量，因此能够提高发电系统的可靠性。简要介绍了发电系统可靠性指标，建立发电系统可靠性分析模型，包括发电容量模型和负荷模型，并分析了非时序蒙特卡洛法在发电系统可靠性评估中的应用。采用模拟法定量，以 IEEE 可靠性测试系统 RTS(Reliability Test System)为例定量分析需求侧管理对发电系统可靠性的影响，分析结果表明实施需求侧管理能够提高能源利用率和发电系统的可靠性，使系统更加安全、经济、可靠地对用户供电。

关键词：需求侧管理；发电系统；模拟法；蒙特卡洛法；可靠性分析

Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system

CAI Dehua[1], CHEN Baixi[2], CHENG Lefeng[2], WANG Liguo[1], YU Tao[2]

(1. Jiangmen Power Supply Bureau, Jiangmen 529030, China; 2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Demand side management can improve energy efficiency and reduce the maximum load demand, which is equivalent to an indirect increase in power generation capacity of the system, thus can improve the reliability of generation system. The reliability indexes of generation system is introduced briefly, the reliability analysis models including generation capacity model and load model are built for generation system, and the non-sequential Monte Carlo method applied in generation system reliability evaluation is analyzed. The IEEE Reliability Testing System (RTS) is set as an example to make a quantitative analysis of the influence of demand side management on generation system reliability evaluation. The analysis results show that implementation of demand side management can improve the energy utilization and reliability of generation system, thus the system can be more secure, economic and reliable to supply electric power for electricity users.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205), National Natural Science Foundation of China (No. 51177051), and Science and Technology Projects of China Southern Power Grid.

Key words: demand side management; generation system; simulation method; Monte Carlo method; reliability analysis

中图分类号： TM76 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)10-0051-06

0 引言

发电系统可靠性评估是供电可靠性研究中的重要环节。发电系统可靠性是指评估统一并网运行的全部发电机组按可接受标准及期望数量来满足电力系统负荷电力和电量需求的能力的度量[1-5]。显然，当发电容量无法满足负荷需求时，用户的用电将难以得到解决，而解决电力供应紧张的传统思路是“开源”，即建设新的发电厂，增加新的电力能源供给[6]。

然而在一般情况下，用电高峰的持续时间较短。为了满足用电高峰的负荷需求而新建发电厂是很不经济的。电力需求侧管理的出现便提供了另一种解决思路——“节流”，即通过采取有效的措施引导电力用户优化用电方式，提高终端用电效率，优化资

基金项目：国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB228205)；国家自然科学基金项目(51177051)；中国南方电网科技项目资助

源配置，“移峰填谷”，减小最大负荷需求，缓解用电高峰时段发电侧的压力，从而提高发电系统的可靠性[7-9]。

由于传统电网水平的限制，目前国内外电力需求侧管理工作的进展都比较缓慢。近几年来兴起的智能电网技术，可以有效解决目前传统电网电力需求侧管理所面临的一些问题，提升电力需求侧管理水平，因此，研究智能电网下电力需求侧管理是很有意义的。

目前关于需求侧管理对发电系统可靠性的影响研究较少，文献[10]采用等效持续负荷曲线 ELDC (Equivalent Load Duration Curve)法定量分析需求侧管理对供电可靠性的影响。然而该方法属于解析法，用于分析复杂系统时，计算过程会比较复杂，计算量也会大大增加。文献[11]分析了 DSM 对负荷特性的影响，提出了在研究 DSM 与系统可靠性的关系方面应将输电制约考虑进来的思想，但是仅针对 DSM 对发输电系统可靠性的改善作用做了定性和定量分析，并研究负荷在大电网中的分散性带来 DSM 开展的地域差异对发输变电系统可靠性的影响，以期为如何协调、合理地进行 DSM 规划提供指导和借鉴；文献[12]基于电力市场环境下，对由于负荷需求弹性的存在，面对电价的波动，用户可适时调整负荷计划，改变实际的负荷曲线，考虑需求弹性的电价负反馈模型，通过对 IEEE30 节点系统进行计算，研究了需求弹性对发电系统可靠性的影响，也即对电源充裕度的影响。这些文献部分研究了 DSM 对发电系统可靠性的影响，大都采用解析法，计算过程比较复杂或者计算量往往较大，因此，本文采用模拟法中的非时序蒙特卡洛法定量分析需求侧管理对供电可靠性的影响，全面计算发电系统的各项可靠性指标，分析结果表明实施需求侧管理可以有效提高发电系统的可靠性。

1 发电系统可靠性分析

1.1 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，它们从不同的角度衡量发电系统的可靠性。发电系统的可靠性指标主要如下。

(1) 电力不足概率(*LOLP*)

给定时间区间内系统发电容量不能满足负荷需求的概率，表达式为

$$LOLP = \sum_{i \in S} P_i \tag{1}$$

式中：P_i 为系统处于状态 i 的概率；S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集。

(2) 缺电时间期望(*LOLE*)

给定时间区间内系统不能满足负荷需求的小时或天数的期望值，即

$$LOLE = \sum_{i \in S} P_i T \tag{2}$$

式中，T 为给定的时间区间，单位为小时或天。

(3) 缺供电量期望(*LOEE*)

系统在给定时间区间内因发电容量不足造成用户停电所损失电量的期望值，即

$$LOEE = \sum_{i \in S} C_i P_i T \tag{3}$$

1.2 发电系统可靠性模型

发电系统可靠性模型一般只考虑发电设备和负荷，而忽略发电设备与负荷之间的电网部分，因此发电系统也被称为发电-负荷需求系统。系统其他部分(输电、配电网络)在分析中均假定可完全满足将全部发电出力传输和分配到预定地点，而不致于出现输电“瓶颈”、过负荷和电压偏移等问题。因此，判断系统正常运行的依据是发电容量的充裕度，即某一系统状态下，发电容量充裕，能够满足负荷需求，则认为系统正常，否则认为系统故障[2-4]。

本文研究的实施 DSM 对于提高发电系统可靠性的评估研究模型如图 1 所示。首先要分别建立起发电容量模型和负荷模型，其中发电容量模型基于两种状态：工作状态和故障状态，同时基于负荷概率分布得出负荷模型，然后采用特定的发电系统可靠性评估方法(非时序蒙特卡洛法，也称为状态抽样法)分析 DSM 对发电系统可靠性的影响，分析结果表明，实施 DSM 能够减少 *LOLP*、*LOLE* 和 *LOEE* 等可靠性指标的值，其效果与新增发电机组相当，

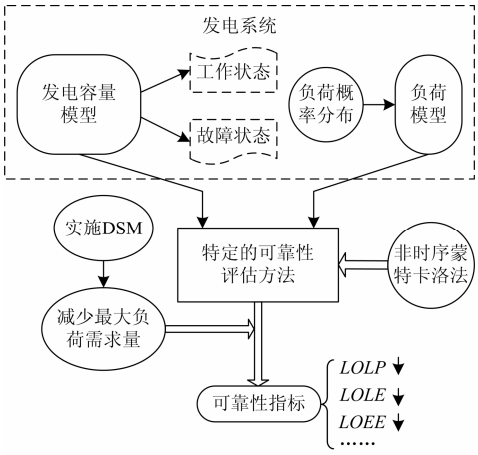

图 1 实施 DSM 对提高发电系统可靠性评估研究模型

Fig. 1 Evaluation study model of implementing DSM on improving reliability of generation system

从而可有效提高发电系统的可靠性，利用实施 DSM 便能计算出发电系统的可靠性指标。

1.2.1 发电容量模型

发电容量模型是以发电机组可靠性模型为基础建立起来的。发电机组可靠性模型即发电机组的停运表，是指一台或多台发电机组各种容量状态的概率和频率表。这里仅针对发电机组是两状态的情况，并且不考虑发电机组的计划检修。如表 1 所示。

表 1 发电容量模型

Table 1 Model of generation capacity

发电机组	发电容量			
	工作状态	概率	故障状态	概率
1#	C_1	$1-p_1$	0	p_1
2#	C_2	$1-p_2$	0	P_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n#	C_n	$1-p_n$	0	p_n

以 G_i 表示第 i 台发电机的发电容量，则

$$G_i=\begin{cases}C_i & \text{工作状态}\\ 0 & \text{故障状态}\end{cases} \tag{4}$$

根据每个发电机的状态确定其发电容量，则系统的总发电容量 G 为

$$G=\sum_{i\in S}G_i \tag{5}$$

式中，S 为系统所有发电机的集合。

1.2.2 负荷模型

在实际计算中，考虑所有因素的时序负荷模型是很难实现的。为了近似表示负荷随季节的变化，常用时序负荷模型模拟系统各时刻的负荷，即：其小时最大尖峰负荷与年最大负荷的比值来表示小时 t 的负荷值 $L(t)$[7]。

$$L(t)=L_{\mathrm{y}}P_{\mathrm{w}}P_{\mathrm{d}}P_{\mathrm{h}}(t) \tag{6}$$

式中：$L(t)$为 t 小时的峰值负荷值；L_{y}是年峰值负荷；P_{w}表示周负荷占年峰值负荷的百分比；P_{d}是日负荷占周负荷峰值的百分比；$P_{\mathrm{h}}(t)$为 t 小时负荷占日峰值负荷的百分比。

根据系统的负荷数据，采用式(6)进行计算，便能得到系统的日负荷曲线，进一步可以列出负荷概率分布表，如表 2 所示。

表 2 中：L_i 是第 i 级负荷水平；n 是负荷水平分级数；T 是负荷曲线的时间总长度；T_i 是第 i 级负荷水平的时间长度。有时为了简化计算，也可以对负荷进行分级，即先确定所要的负荷分级水平，再将负荷曲线上各个点的大小分配到最接近的一个级别。例如将 2 978 MW 和 3 009 MW 分配到 3 000 MW 级别。但是这样做会带来误差。

表 2 负荷概率分布表

Table 2 Load probability distribution table

负荷水平	概率
L_1	$P_1=T_1/T$
L_2	$P_2=T_2/T$
⋮	⋮
L_i	$P_i=T_i/T$
⋮	⋮
L_n	$P_n=T_n/T$

1.2.3 非时序蒙特卡洛法

非时序蒙特卡洛法，又称为状态抽样法[4]，是模拟法的一种，目前已广泛应用于电力系统可靠性评估中。该方法的依据是：一个系统的状态是所有元件状态的组合，且每个元件的状态可用出现在该状态的概率来进行抽样确定。

采用非时序蒙特卡洛法评估发电系统可靠性的具体步骤如下。

(1) 对系统中的第 i 台发电机，在[0,1]区间抽取均匀分布的随机数 R_i，假设该台发电机的强迫停运率为 P_i，则第 j 台发电机的状态可由式(7)确定。

$$S_j=\begin{cases}0 & R_i>P_i \quad \text{(故障状态)}\\ 1 & 0\le R_i\le P_i \quad \text{(工作状态)}\end{cases} \tag{7}$$

(2) 按照式(7)得到系统中每台发电机的状态后，确定该状态下发电机的发电容量，并将系统全部发电容量叠加，得到系统总的发电功率。

(3) 对表 2 中某一给定的负荷水平 L_i，重复步骤(1)、(2)，每次重复记为一次抽样，在第 k 次抽样中的电量不足 *DNS*(Demand not supplied)由式(8)计算。

$$DNS_k=\max\left\{0,L_i-\sum_{j=1}^{m}G_{jk}\right\} \tag{8}$$

式中：G_{jk} 是第 j 台发电机在第 k 次抽样中的可用容量；m 是系统中发电机总数。

(4) 遍历全部负荷水平，通过式(9)～式(12)计算出系统的可靠性指标。

$$LOLP=\sum_{i=1}^{N_L}\left(\frac{P_i}{N_k}\sum_{k=1}^{N_k}I_k(DNS_k)\right) \tag{9}$$

$$LOLE=\sum_{i=1}^{N_L}\left(\frac{T_i}{N_k}\sum_{k=1}^{N_k}I_k(DNS_k)\right) \tag{10}$$

$$I_k(\mathrm{DNS}_k)=\begin{cases}0 & DNS_k=0\\ 1 & DNS_k\neq 0\end{cases} \tag{11}$$

$$LOEE=\sum_{i=1}^{N_L}\left(\frac{T_i}{N_k}\sum_{k=1}^{N_k}DNS_k\right) \tag{12}$$

其中，N_k是状态抽样的次数。

2 需求侧对发电系统可靠性的影响

电力需求侧管理(Demand Side Management，DSM)是指在电力市场中电能供应方、电能中介者、政府与用户共同协作，采取各种措施(包括经济激励、技术措施、政策措施等)以改变用户用电方式、减少用电消耗、降低系统负荷峰谷差，从而提高各参与方的利益而进行的管理活动[10-12]。

电力需求侧管理是一种利用行政、经济、技术手段对需求侧的电力、天然气、采暖、制冷等各种能源的综合规划的方法。可以有效调节节电电力供需平衡，促进电力资源优化配置，符合我国基本国情，特别是在目前频频“电荒”的情况下，电力需求侧管理更显示出其重要的现实意义[13-14]。

在智能电网中，需求侧管理等将成为电网运行的重要部分。需求侧管理技术能够引导用户有序用电，在用电紧张时，促使用户减少用电，在发电容量充裕时，鼓励用户多用电，这对负荷曲线分别形成了削峰和填谷两种影响，使负荷曲线趋于平缓，在根据日负荷曲线统计得出的负荷概率分布表中，最大负荷水平和最小负荷水平相应的会减小和增大。因此，需求侧管理对增强系统可靠性最直接的影响是减少了最大负荷需求量，相当于间接增加了电源容量，供电可靠性得到提高。

3 算例分析

以 IEEE 可靠性测试系统 RTS(Reliability Test System)[15]为例定量分析需求侧管理对发电系统可靠性的影响。

系统中有32台发电机，设备参数参考文献[15]。选取该系统负荷水平最高的一天进行评估。根据系统负荷数据，这一天为第 51 周的星期二。用式(6)计算各个时间点的最大负荷，得到系统的日负荷曲线如图 2 实线所示。

情况 1：根据实施 DSM 之前的日负荷曲线得到负荷概率分布表(如表 3 所示)。采用非时序蒙特卡洛法计算实施需求侧管理前的发电系统可靠性指标，状态抽样的次数N_k为1万次，方差系数β<0.002。

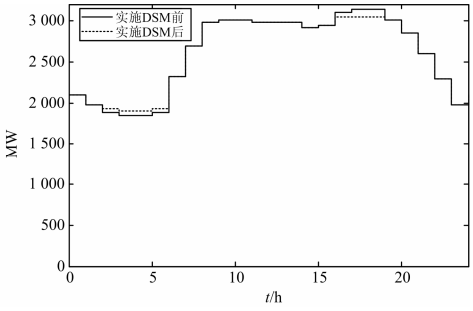

图 2 实施需求侧管理前后的日负荷曲线

Fig. 2 Daily load curve before and after the implementation of demand side management

表 3 实施需求侧管理前的负荷概率分布表(一天)

Table 3 Load probability distribution table before the implementation of demand side management (one day)

负荷水平/MW	持续时间/h	概率
1 850	2	0.083
1 881	2	0.083
1 975	2	0.083
2 100	1	0.042
2 289	1	0.042
2 320	1	0.042
2 602	1	0.042
2 696	1	0.042
2 853	1	0.042
2 916	1	0.042
2 947	1	0.042
2 978	4	0.167
3 010	3	0.125
3 104	1	0.042
3 135	2	0.083

情况 2：假定实施 DSM 能够减少用电高峰时段(16 时至 20 时)50 MW 至 100 MW 的负荷需求，得到新的日负荷曲线如图 2 虚线所示。根据实施 DSM 后的日负荷曲线列出实施 DSM 后的负荷概率分布表(如表 4 所示)。用相同的方法计算实施 DSM 之后的发电系统可靠性指标。

情况 3：在情况 1 的条件下，新增一台 100 MW 的发电机组，计算发电系统的可靠指标。

以上三种情况的计算结果如表 5 所示。

对计算结果进行分析，可以得到以下结论：

(1) 对比实施 DSM 前后的发电系统可靠性指标可知，实施 DSM 之后，系统的 *LOLP*、*LOLE* 和 *LOEE* 等可靠性指标都得到了降低，发电系统可靠性得到提高。

表 4 实施需求侧管理后的负荷概率分布表(一天)

Table 4 Load probability distribution table after the implementation of demand side management (one day)

负荷水平/MW	持续时间/h	概率
1 900	2	0.083
1 941	2	0.083
1 975	2	0.083
2 100	1	0.042
2 289	1	0.042
2 320	1	0.042
2 602	1	0.042
2 696	1	0.042
2 853	1	0.042
2 916	1	0.042
2 947	1	0.042
2 978	4	0.167
3 010	3	0.125
3 050	3	0.125

表 5 三种情况下的计算结果

Table 5 Calculation results under 3 stated conditions

指标	实施 DSM 之前	实施 DSM 之后	新增发电机组
LOLP	0.034 3	0.021 7	0.013 1
LOLE/(h/d)	0.708 3	0.521 0	0.308 6
LOEE/(MWh/d)	81.445 1	56.598 6	30.399 2

(2) 对比实施 DSM 后及新增发电机组的可靠性指标可知，实施 DSM 对发电系统可靠性的提升效果与新增发电机组相当。

(3) 在计算中假定实施 DSM 可以减少用电高峰时段 50 MW 至 100 MW 的负荷需求，而实际运用中，最大负荷的减少量会因实施 DSM 的手段、政策和实施力度的不同而不同，需要视具体情况而定。

4　结论

采用模拟法定量分析 DSM 对发电系统可靠性的影响，分析结果表明，实施 DSM 能够减少 *LOLP*、*LOLE* 和 *LOEE* 等可靠性指标的值，提高发电系统的可靠性，其效果与新增发电机组相当。

需求侧管理是智能电网运行中的一部分，有利于提高能源的利用率，使系统更加安全、经济、可靠地对用户供电。需求侧管理对供电可靠性的影响还需在实际运行中积累经验，并做进一步的研究。

参考文献

[1] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.

[2] 汪兴强, 丁明, 韩平平. 互联电力系统可靠性评估的改进等效模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 201-207.
WANG Xingqiang, DING Ming, HAN Pingping. An improved equivalent model for reliability evaluation in interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 201-207.

[3] 王晶, 王昉, 潘杰, 等. 全概率公式在发电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 69-72, 76.
WANG Jing, WANG Fang, PAN Jie, et al. Application of total probability formula in power generation system reliability evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 69-72, 76.

[4] 蒋泽甫, 谢开贵, 胡博, 等. 风力发电系统可靠性评估解析模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 52-57, 95.
JIANG Zefu, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Wind power generation analytical model for the reliability evaluation of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 52-57, 95.

[5] 麦玮斌. 智能电网下肇庆市电力需求侧管理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
MAI Weibin. Research on power demand side management under the smart grid in Zhaoqing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[6] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
BIE Chaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.

[7] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, ZHU Guojun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.

[8] 陈剑勇, 蔡红梅, 苏浩益. 盲数理论在发电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 74-77, 83.

CHEN Jianyong, CAI Hongmei, SU Haoyi. Application of blind number theory in power generation system reliability evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 74-77, 83.

[9] 胡国伟, 别朝红, 王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2013, 27(5): 58-65.
HU Guowei, BIE Chaohong, WANG Xifan. Optimal dispatch in wind integrated system considering operation reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 27(5): 58-65.

[10] 管益斌, 赵翠宇. 实施需求侧管理技术对系统可靠性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 31(9): 63-66.
GUAN Yibin, ZHAO Cuiyu. Influence analysis of implementing DSM technology on system's reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 31(9): 63-66.

[11] 张鹏. 电力需求侧管理改善电力系统可靠性的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
ZHANG Peng. Study on demand side management on power system reliability[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.

[12] 周宇, 韩如月, 陈可科. 需求弹性对发电系统可靠性的影响[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(3): 19-21.
ZHOU Yu, HAN Ruyue, CHEN Keke. Effect of demand elasticity on generation system reliability[J]. Power Demand Side Management, 2006, 8(3): 19-21.

[13] 谢林, 谢开贵, 何坚, 等. 计及控制策略的并网型微电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 40(15): 102-109.
XIE Lin, XIE Kaigui, HE Jian, et al. Reliability evaluation of grid-connected micro-grid considering control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 40(15): 102-109.

[14] 谢林. 计及储能与控制策略的微电网可靠性评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
XIE Lin. Reliability evaluation of microgrid considering energy storage and control strategies[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.

[15] 汪隆君. 电网可靠性评估方法及可靠性基础理论研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
WANG Longjun. Research on reliability evaluation approach of power grid and reliability basic theory[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

收稿日期：2014-07-18

作者简介：

蔡德华(1965-)，男，本科，高级工程师，主要工作领域为电网运行、电力系统自动化;

陈柏熹(1990-)，男，硕士研究生，主要研究方向为配网自动化及电能质量分析;

程乐峰(1990-)，男，通信作者，硕士研究生，主要研究领域为配网自动化、电能质量分析与控制。E-mail: chenglf_scut@163.com

(编辑 姜新丽)