

计及激励型需求响应的微电网可靠性分析

陈天马

(清远供电局,广东 清远 511518)

摘要:鉴于激励型需求响应能够引导用户调整用电行为、主动参与负荷削减,而微电网中的分布式电源及储能能为实施激励型需求响应提供响应时间,文中对计及激励型需求响应的微电网可靠性进行了重点研究。首先分析了激励型需求响应的机理及其对供电可靠性的影响,接着对用户进行分级、建立了需求响应的调度模型,然后以用户收益最大为目标建立用户侧的响应模型,并提出了计及激励型需求响应的微电网负荷削减策略,最后基于蒙特卡洛模拟方法对改进的 RBTS Bus6 测试系统进行可靠性评估和经济性分析。算例结果验证了所建模型的有效性,证明了激励型需求响应能有效提高微电网的可靠性和经济性。采用随机优化理论,研究具有提前通知选择时供电公司对于可中断负荷的最优决策模型,并给出模型的解析解。

关键词:激励型需求响应;微电网;可靠性;负荷削减策略

文章编号:2096-4633(2018)02-0045-09 **中图分类号:**TM63 **文献标志码:**B

微电网是一种将分布式电源、储能装置、负荷、变流器及监控保护装置有机整合在一起的小型发电系统^[1]。凭借微电网的运行控制和能量管理等关键技术,可以实现微电网并网或孤岛运行,降低间歇性分布式电源带来的不利影响^[2],提高供电可靠性和电能质量。目前,微电网被普遍认为是间歇性可再生能源发电集成和管理的有效解决方案^[3]。近年来,国内外均开展了微电网试验示范工程研究,以进行控制策略测试及运行特性研究,其中微电网可靠性是整个微电网体系中的重要研究内容。

需求响应(demand response, DR)是指电力用户根据电价信号或激励机制,主动调整其电力消费方式,达到缓解电力供应紧张的一种用电行为^[4-5]。需求响应可分为价格型和激励型两种。价格型 DR 通过价格信号(分时电价、实时电价、尖峰电价等)引导用户调整用电行为^[6],达到削峰填谷、促进分布式电源消纳的作用;基于合同的激励型 DR 通过经济激励来引导用户参与电力系统所需的负荷削减项目^[7],在系统容量短缺时减小容量缺额,减少或避免停电事故的发生。

作为智能用电的重要环节,需求响应已得到国内外学者的广泛关注,但目前的研究主要集中在需求响应的机理、应对大规模清洁能源消纳的需求响应建模、需求响应效益评估和支持技术等

方面,有关需求响应对供电可靠性的研究较少。文献[8]提出了需求响应虚拟电厂的概念,考虑 DR 的不确定性进行建模,评估了响应不确定性对电力不足期望的影响。文献[9]建立了分时电价优化模型,引入基于电价的负荷修正进行负荷聚类分析,最后将不同负荷水平下的指标加权平均得到配电网的供电可靠性指标。文献[10]以用户确切的可靠性期望作为基本约束条件,建立了峰谷分时电价模型。

综上所述,目前关于 DR 对供电可靠性的研究主要集中在峰谷分时电价的建模及其对可靠性的影响等方面,在可靠性评估中计及激励型 DR 的相关研究尚未见报道。在激励型 DR 中,电力公司先和参与 DR 项目的用户签订协议,在电网出现容量短缺或发生紧急情况时,电力公司遥控调整或关闭用户部分负荷,或向用户发送响应信号,用户根据信号调整自身用电情况,电力公司根据响应量支付给用户一定的经济激励或电费折扣^[11]。由于激励型 DR 通常需要一定的时间来进行响应,无法在电网发生故障时立即减负荷以维持供需平衡,因此在以往的电力系统可靠性评估中通常不考虑激励型 DR。对于并网型微电网,当外部电网发生故障、微网切换为孤岛运行模式时,分布式电源及储能能为实施激励型 DR 进行负荷削减提供响应时间。在用户调整用

电行为之前,微电网由分布式电源和储能联合供电直至 DR 用户完成负荷削减,微网重新进入供需平衡状态。若不实施激励型 DR,微网需要增大分布式电源和储能的容量才能提高孤岛运行状态下的供电可靠性,但目前分布式电源和储能的投资和运行成本偏高,不利于微网的经济运行。而激励型 DR 仅需支付给用户一定的经济补偿,投资和运行成本较低,尤其是可中断负荷项目在未实施时成本为零^[12-13],是提高微电网可靠性的一个经济可行的措施。

本文建立了一种计及激励型需求响应的微电网可靠性评估方法,其基本思路如下:①建立激励型需求响应的调度模型和响应模型;②采用蒙特卡洛方法模拟电网元件运行状态,当微网孤岛运行时,求解调度模型得各用户的应削减负荷量;③求解响应模型得用户实际削减量,进而判断微网各负荷点的运行状态;④进行可靠性评估指标的计算。

1 激励型需求响应机制

常见的激励型需求响应项目包括:直接负荷控制(direct load control, DLC)、可中断负荷(interruptible load, IL)和紧急需求响应(emergency demand response, EDR)等^[13]。

1.1 直接负荷控制

DLC 是指在系统负荷高峰或紧急情况下,以支付给用户一定经济补偿或电费折扣作为交换,电力部门遥控调整或关闭用户电器设备的项目。参与 DLC 项目的多为空调和热水器等允许短时停电且具有热/冷能储存能力的负荷,同时为了保证用户舒适度,DLC 一般只进行短时停电。

由于 DLC 项目一般在系统负荷高峰时为避免紧急情况或为了节约购电成本时采用,且参与 DLC 的通常为小型负荷,需要大量用户参与才能达到预期的负荷削减效果,停电次数和时间都有限制,因此本文不深入讨论 DLC 项目与微网可靠性的关系。

1.2 可中断负荷

IL 是指在系统负荷高峰或紧急情况下,电力公司向签订 IL 协议的用户发出信号,用户响应信号削减或中断负荷,获得电费折扣或中断补偿。如果用户没有依照协议约定削减相应负荷,则会受到相应的惩罚。IL 响应速度快、未投入时零成

本,已成为电网调度机构调峰和处理紧急状况的重要工具^[14]。

1.3 紧急需求响应

EDR 是由电力公司设置一个激励性的用户补偿价格,在出现可靠性事故时,用户削减负荷则可获得相应的中断补偿^[15]。与 IL 不同的是,EDR 一般不用于负荷削峰,用户的负荷削减行为是自愿的,不响应不会受到惩罚。因此,在补偿价格相同的情况下,EDR 用户响应的概率会比 IL 用户低。

2 需求响应调度模型

2.1 需求响应用户分级

激励机制是实施激励型 DR 最重要的因素。上海、河北等地区制定了统一的响应补偿标准,如上海根据响应速度的不同,30 min 内响应的补偿 2 元/(kW·h),60 min 内补偿 1 元/(kW·h)^[16]。但这种补偿标准仅考虑响应速度,无法充分调动响应速度慢的大用户的响应积极性。本文采用专家评分法,综合考虑响应速度、响应率和响应量三个因素对 DR 用户进行分级。其中,响应速度是指用户从接到响应信号至完成响应所用的时间;响应率指用户实际参与响应的次数占收到响应信号总次数的比例;响应量是指用户每次参与响应所削减的负荷量,取一段时间内的平均值。

记 DR 用户在响应速度、响应率和响应量三个评分项目的得分分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 ,三项的权重分别为 A_1 、 A_2 、 A_3 ,则用户的总得分 W 为:

$$W = \sum_{i=1}^3 A_i M_i \quad (1)$$

根据 W 对 DR 用户进行分级,总得分在 7.5 ~ 10 分的为 I 级用户,5 ~ 7.5 分的为 II 级用户,5 分以下的为 III 级用户。

2.2 DR 互动响应量分配原则

电力公司预期的激励型 DR 用户的响应量分配采用多平衡机的静态算法^[17]来计算。静态算法首先进行系统不平衡功率分配,不平衡功率 ΔP 计算如下:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^I P_{Gi} - \sum_{i=1}^I P_{Li} - P_{loss} \quad (2)$$

式中: I 为系统总节点数; P_{Gi} 和 P_{Li} 分别为节点 i 当前发电输出功率和负荷功率; P_{loss} 为系统总网损;不平衡功率 ΔP 应由当前所有平衡发电机共同

分担。

类似地,可根据 DR 用户的响应特征和电网运行的目标,将系统不平衡功率分配给各个激励型 DR 用户,得到电网对各个 DR 用户的预期响应量。考虑到用户的响应意愿及违约给电网带来的风险,本文优先将不平衡功率分配给总评分 W 高的用户。

2.3 激励型需求响应调度模型

电力系统负荷高峰或可靠性受到威胁时,调度部门将 ΔP 分配给各 DR 用户。为了提高供电可靠性、降低用户违约给电网带来的风险,本文以所调度的 DR 用户平均总评分最高作为目标函数,如下所示:

$$\max \bar{W} = \sum_{i=1}^n (W_i Z_i) / \sum_{i=1}^n Z_i \quad (3)$$

式中: $\bar{W}$ 为参与响应的用户平均总评分; n 为激励型 DR 用户数量; W_i 为用户 i 的总评分; Z_i 为状态变量,若用户 i 参与响应则 Z_i 等于 1, 否则等于 0。

2.3.1 响应量约束

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_i \geq \Delta P \quad (4)$$

式中: ΔP_i 表示用户 i 的响应量。

2.3.2 响应速度约束

$$\max(t_{s,i}) < T_{s,\max}, i \in N \quad (5)$$

式中: $t_{s,i}$ 为用户 i 从收到响应信号到完成响应所用的时间; N 为所有激励型 DR 用户的集合; $T_{s,\max}$ 为响应速度限制值,即要求用户必须在 $T_{s,\max}$ 时间内完成响应, $T_{s,\max}$ 主要取决于储能的容量及 ΔP , 其计算方法如式(6)所示:

$$T_{s,\max} = (Q_{re} - Q_{\min}) / \Delta P \quad (6)$$

式中: Q_{re} 为储能的剩余容量; $Q_{\min}$ 为储能的最小容量限制。

2.3.3 响应时间约束

$$\min(t_{d,i}) \geq \omega T_d, i \in N \quad (7)$$

式中: $t_{d,i}$ 为用户 i 响应的持续时间; $\omega > 1$, 是响应时间裕度系数,为规避用户提前结束响应给电网带来风险而设置; T_d 为调度部门预期的电网故障修复时间。

2.3.4 响应比例约束

$$\forall i \in N, \Delta P_i / P_i \leq \lambda_{i,\max} \quad (8)$$

式中: P_i 为用户 i 响应前的负荷功率; $\lambda_{i,\max}$ 为用户 i 所签协议中规定的最大响应比例。

2.3.5 响应次数约束

$$\forall i \in N, s_i + 1 \leq S_i \quad (9)$$

式中: s_i 为用户 i 该年份已响应的次数; S_i 为用户 i 协议中规定的最大年响应次数。

3 需求响应行为建模

3.1 激励型 DR 的影响因素

激励型 DR 用户收到响应信号后采取的响应行为取决于用户能否从响应中获利^[17]。即用户综合考虑补偿金额、电费折扣、响应量、停电成本和未响应惩罚等因素,做出使自身收益最大的响应决策。

现有的激励型 DR 行为分析和建模方法主要有聚合控制模型^[18]、不确定性建模^[19]、基于数据统计方法^[20]和需求侧目标优化^[21]等。其中,聚合控制模型适用于直接负荷控制方式下对温控负荷的建模;不确定性模型兼顾了响应行为主观、随机的特点,突出激励水平对负荷削减或转移能力的影响;基于数据统计的方法可以得到某一地区的较为精确的响应结果,但需要大量历史数据作为支撑;需求侧响应目标优化的方法虽然需要考虑的现实因素多,但其目标明确、思路清晰,适用范围广。因此本文主要采用基于需求侧目标优化的方法,并计及 DR 的不确定性,建立 IL 和 EDR 用户的统一响应模型。

3.2 目标函数

以用户经济收益最大作为用户响应模型的目标函数,如下所示:

$$\max L = R - C_1 - C_2 - F \quad (10)$$

式中: L 为用户总经济收益; R 为响应收益; C_1 为用户停电损失; C_2 为响应时段内用户的电费成本; F 为未响应惩罚。其计算公式分别为:

$$R = \begin{cases} \Delta P_n E t_d & \Delta P_a \geq \Delta P_n \\ \Delta P_a E t_d & \Delta P_a < \Delta P_n \end{cases} \quad (11)$$

$$C_1 = (K_1 \Delta P_a^2 + K_2 \Delta P_a - K_2 \Delta P_a u) t_d \quad (12)$$

$$C_2 = \int_{t_0}^{t_0+t_d} \alpha p (P(t) - \Delta P_a) dt \quad (13)$$

$$F = \begin{cases} 0 & \Delta P_a \geq \Delta P_n \\ (\Delta P_n - \Delta P_a) p_f t_d & \Delta P_a < \Delta P_n \end{cases} \quad (14)$$

式(11)为响应收益等式, ΔP_n 为电力公司要求的响应量, ΔP_a 为用户实际响应量, E 为单位响应量补偿金额, t_d 为用户响应的持续时间; 式(12)为用户停电损失等式, 采用二次函数进行量化描述, K_1 和 K_2 为常系数, u 是 $(0,1)$ 区间内的随机值, 用以表示用户执行响应的主观性和不确定性; 式(13)为响应时间 t_d 内的电费等式, t_0 为开始响应的时刻, α 为电费折扣率, p 为电价, $P(t)$ 为用户负荷随时间变化的函数; 式(14)为未响应惩罚等式, p_f 为惩罚系数, 若用户响应量达到电力公司要求则不受惩罚, 否则受到相应差额电量的惩罚, 其中 EDR 用户没有惩罚。

3.3 约束条件

$$0 \leq \Delta P_a \leq P(t_0) \quad (15)$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha & \Delta P_a \geq \Delta P_n \\ 1 & \Delta P_a < \Delta P_n \end{cases} \quad (16)$$

$$t_s \leq t_{s,n} \quad (17)$$

式(15)为响应量约束, 表明实际响应量不大于用户响应前的负荷量; 式(16)为 IL 用户电费折扣约束, 当用户实际响应率达到电力公司要求时才有电费折扣; 式(17)为响应速度约束, t_s 为用户从收到响应信号到完成响应所用的时间, $t_{s,n}$ 为用户签订的协议中要求的完成响应时间。

4 可靠性评估方法

4.1 计及激励型 DR 的负荷削减策略

并网型微电网有并网和孤岛两种运行状态, 当配电网发生故障或电能质量出现问题时, 微电网能迅速切换进入孤岛运行。孤岛模式下, 若微电网内部电源出力不足, 则要进行负荷削减以保证重要负荷的正常供电。由于激励型 DR 需要一定的时间来进行响应, 无法马上削减负荷以填补电网容量缺额, 因此在以往的负荷削减策略中一般只考虑切负荷, 不计及 DR。在微网中, 分布式电源和储能能够为实施激励型 DR 提供时间基础。储能可以增大输出功率配合分布式电源短时为负荷供电, 然而由于储能装置容量有限, 无法为长时间大功率输出, 此时可以实施激励型 DR, 电力公司向签约的 DR 用户发出信号, 用户响应信号削减负荷, 从而避免储能电量耗尽后必须切负荷而影响微电网供电可靠性。

文献[22]综合考虑临近原则和负荷重要程度建立了大电网可靠性评估中的最优负荷削减模型; 文献[23]基于负荷分块思想, 综合考虑负荷的电气位置及重要程度, 研究了微网负荷分块削减策略。本文综合考虑负荷分块、微网结构、负荷重要程度和激励型 DR, 提出了计及激励型 DR 的微网负荷削减策略, 流程框图如图 1 所示, 其详细步骤见本文 4.2 节计及激励型需求响应的含微网配电网可靠性评估步骤中的第 i 到 viii 步。

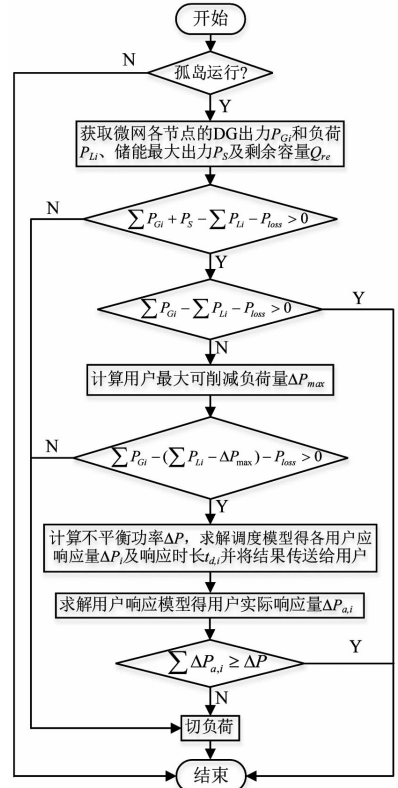


图 1 计及激励型 DR 的微电网负荷削减流程框图

Fig. 1 Flow chart of load curtailment strategy of micro grid considering incentive demand response

4.2 含微网的配电网可靠性评估

本文基于蒙特卡洛模拟方法, 提出一种计及激励型需求响应的含微网配电网可靠性评估方法, 其具体步骤如下:

(1) 数据初始化, 设定仿真年限。

(2) 根据各元件故障率 θ_j 按照式(18)对电网所有元件的无故障工作时间 TTF 进行随机抽样:

$$TTF_j = - (1/\theta_j) \ln u \quad (18)$$

式中: TTF_j 代表第 j 个元件的无故障工作时间; u 为 $(0,1)$ 之间服从均匀分布的随机数。

(3) 选取 TTF 最小的元件作为故障元件, 记其

编号为 m , 则系统的正常工作时间 $TTF_s = TTF_m$, 累计仿真时间。

(4) 根据元件 m 的修复率 μ_m 按照式 (19) 对故障元件的修复时间 TTR_m 进行随机抽样:

$$TTR_m = - (1/\mu_m) \ln u \tag{19}$$

(5) 根据故障元件的位置, 分析该元件故障对负荷的影响, 将负荷分为五类。A 类: 不受该元件故障影响的负荷; B 类: 隔离故障后可恢复供电的负荷; C 类: 通过转供可恢复供电的负荷; D 类: 不可转供负荷; E 类: 微电网负荷。

(6) A 类负荷不停电; B、C、D 三类负荷各停电一次, 停电时间分别为故障隔离时间 T_{gl} 、负荷转供时间 T_{zg} 及故障修复时间 TTR_m , 分别累计各负荷的停电时间和停电次数; 对于 E 类负荷, 先判断微电网的运行模式, 若并网运行, 则不停电; 若孤岛运行, 则作如下处理:

① 孤岛数据初始化, 令 $t = TTF_s$ 。

② 获取时刻 t 微电网各节点的分布式电源出力 P_{Gi} 和负荷功率 P_{Li} 、储能最大出力 P_s 及剩余容量 Q_{re} , 若 $\sum P_{Gi} + P_s - \sum P_{Li} - P_{loss} > 0$, 则进行下一步, 若否, 则转至⑦。

③ 若 $\sum P_{Gi} - \sum P_{Li} - P_{loss} > 0$, 则转至⑧, 若否则进行下一步。

④ 计算最大可削减负荷量 $\Delta P_{max} = \sum_{i=1}^n P_i(t) \lambda_{i,max}$ 。若 $\sum P_{Gi} - (\sum P_{Li} - \Delta P_{max}) - P_{loss} > 0$, 则进行下一步, 若否, 则转至⑥。

⑤ 计算系统不平衡功率 ΔP , 根据式 (6) 计算 $T_{s,max}$, 求解调度模型得出各 DR 用户的响应量 ΔP_i 及削减时长 $t_{d,i}$, 并将结果传送给用户。

⑥ 求解用户响应模型得用户实际响应量 $\Delta P_{a,i}$, 若 $\sum \Delta P_{a,i} \geq \Delta P$, 则转至⑧, 若否, 则进行下一步。

⑦ 根据负荷的重要程度及电气位置进行切负荷, 累计所切负荷的停电次数和停电时间。

⑧ 结束本次循环。

(7) 判断当前仿真时间是否达到设定的仿真年限, 若否, 返回 (2), 若是, 执行下一步。

(8) 根据各负荷点的停电次数及停电时间, 计算负荷点的可靠性指标, 最后计算系统的可靠性指标。

5 算例分析

5.1 算例说明

采用改进的 RBTS - BUS6 系统的 F4 主馈线作为原始配电网络, 分支线 21 处为微电网与配电网的公共连接点, 在线路 21 处接入风电机组和储能, 在线路 22 处接入微型燃气轮机组, 如图 2 所示。分布式电源及储能的参数见表 1, 其余元件的故障率、修复时间等参数见文献 [24], 线路及负荷参数见文献 [25]。

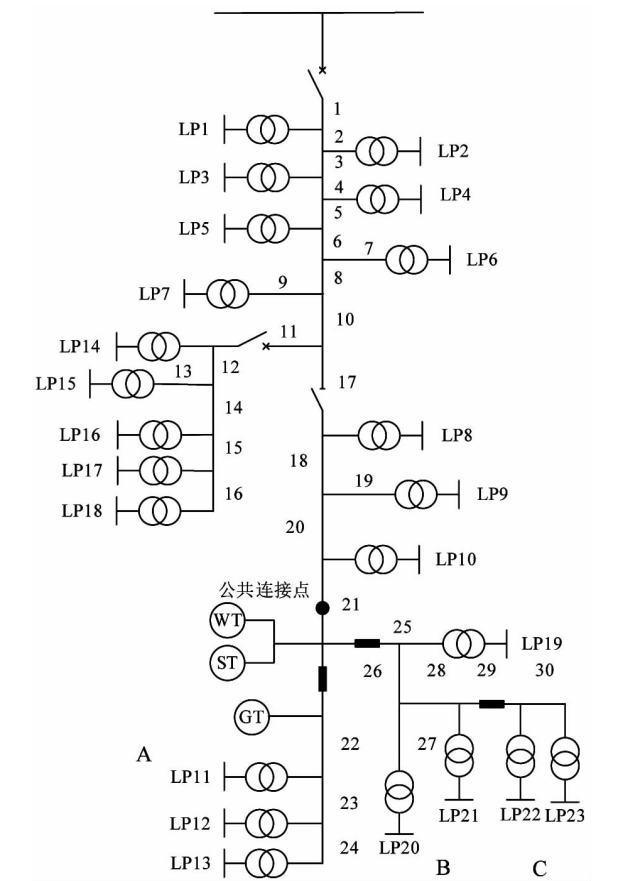


图 2 改进的 RBTS Bus6 F4 馈线系统

Fig. 2 Modified RBTS Bus6 F4 feeder system

表 1 分布式电源及储能参数

Tab. 1 Data of distributed generation and storage

元件	额定功率 /MW	故障率次 /年	修复时间 /h
风电机组	1.5	0.25	20
微型燃气轮机	0.6	0.20	8
储能系统		0.25	10

风电机组的切入、额定及切除风速分别为 9、38 和 80 km/h, 设风速服从双参数威布尔 (Weibull) 分

布,其形状参数 k 为 2,尺度参数 c 为 8.03。储能系统的容量为 $1\text{ MW}\cdot\text{h}$,最大出力为 0.5 MW 。负荷的日变化曲线及年变化曲线数据见文献[26]。微型燃气轮机组采用如式(20)所示的出力模型,单位为 MW 。

$$P_{GT}(t) = \begin{cases} 0 & t = 0 - 15, 21 - 24 \\ 0.6 & t = 16 - 20 \end{cases} \quad (20)$$

5.2 DR 调度模型及响应模型参数

选取 LP13、21 和 23 作为激励型 DR 用户,LP13 和 21 为 IL 用户,LP23 为 EDR 用户,其用户分级分别为 I 级、II 级和 III 级,其参数如表 2 所示。在实际运行中,不同用户的停电意愿可根据历史数据进行预测,此处不妨直接设定响应模型中的常系数 K_1 、 K_2 分别为 0.75 和 1。

表 2 DR 用户参数

Tab. 2 Data of DR customers

编号	补偿价格 /(元/(kW·h))	电费折扣	惩罚 /(元/(kW·h))	负荷最大 削减比例 /%	响应 时间 /min
13	2	0.4	0.2	80	<30
21	1.5	0.6	0.3	70	<60
23	1	1	0	60	<90

根据以上参数,在 Matlab 中编写程序对调度模型及响应模型进行求解,并将结果代入到可靠性评估算法中。

5.3 可靠性评估结果

本文针对如下 3 种方案进行可靠性评估和分析。方案 1:不含微电网且不计及 DR;方案 2:含微电网但不计及 DR;方案 3:含微电网且计及 DR。

选取 LP1、9、11、20、22 作为典型负荷,其故障率和停电时间指标如图 3 和图 4 所示,其中 LP1、9 为非微网负荷,LP11、20、22 为微网负荷,分别位于微网 A 区、B 区和 C 区,其负荷分区的重要程度为 $A > B > C$ 。

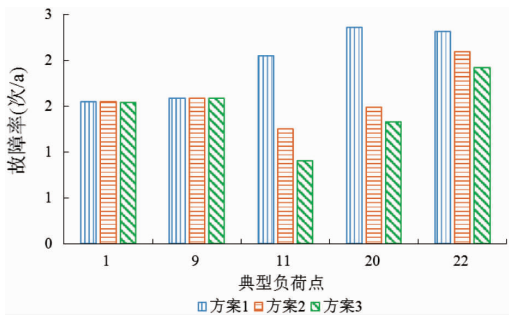


图 3 典型负荷点的故障率

Fig. 3 Failure rate of typical load points

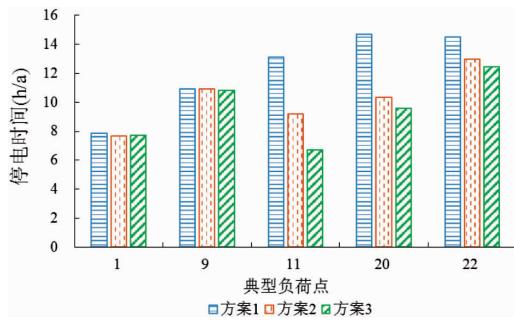


图 4 典型负荷点的年均停电时间

Fig. 4 Annual average interruption duration of typical load points

系统及微电网的可靠性评估结果分别如表 3 和表 4 所示,其中,SAIFI 为系统平均停电频率指标,SAIDI 为系统平均停电时间指标,ASAI 为平均供电可用率指标,EENS 为电量不足期望指标。

表 3 系统可靠性指标

Tab. 3 Reliability indices of distribution system

方案	SAIFI	SAIDI	ASAI/%	EENS
1	1.827 2	10.235 6	99.883 2	54.01
2	1.648 6	9.319 3	99.893 6	48.80
3	1.578 0	9.035 8	99.896 9	47.00

表 4 微电网可靠性指标

Tab. 4 Reliability indices of microgrid

方案	SAIFI	SAIDI	ASAI/%
2	1.505 2	10.296	99.882 4
3	1.244 5	9.114 6	99.896 0

计算结果表明:

(1)微电网的接入和计及激励型 DR 的负荷削减策略能够有效降低微电网负荷的故障率和停运时间,提升整个配电系统和微电网的可靠性水平。

(2)在分布式电源和储能配置相同的情况下,实施激励型 DR 能进一步提升配电系统和微电网的可靠性水平,微电网的 SAIFI 和 SAIDI 指标分别降低 17.3% 和 11.5%。

(3)微电网和激励型 DR 对负荷点可靠性提升的程度与微网内分块负荷的重要程度有关,重要等级越高的负荷点可靠性水平提升越多。

5.4 经济成本分析

电力系统中成本主要包括投资成本和运行

维护成本两部分。IL、EDR 等激励型 DR 项目仅需与用户签订协议,在电网需要时通知用户进行响应,基本不需要投资成本。激励型 DR 的运行成本包括支付给用户的中断补偿及电费折扣等。方案 3 的储能配置及 DR 项目的运行成本如表 5 所示。

表 5 方案 3 储能配置及 DR 运行成本
Tab. 5 Storage configuration and DR running cost for scheme 3

方案	储能容量 /(MW·h)	储 能 最大出力 /MW	DR 年均 实施次数	年均 补偿成本 /元
3	1	0.5	0.488	1 783.5

5.3 节的仿真结果表明在分布式电源和储能配置相同的情况下,实施激励型 DR 能进一步提高微电网可靠性。而增大微网中配置的储能容量也能减少负荷的停电次数和时间,提高可靠性。因此,本节设置方案 4,增大储能容量和最大出力使方案 4 的微网可靠性指标与方案 3 的相同,对比分析两个方案的成本。方案 4 的配置参数及微网可靠性指标如表 6 所示。

表 6 方案 4 配置参数及可靠性指标
Tab. 6 Configuration parameters and reliability index for scheme 4

方案	储能容量 /MW·h	储 能 最大出力 /MW	SAIFI	SAIDI
4	2.16	1.03	1.248 3	8.804 0

对比可知,方案 3 的激励型 DR 项目投资成本很低,年均补偿成本为 1 783.5 元,年均实施次数少,对用户满意度影响小。在微网可靠性水平相近的情况下,方案 3 比方案 4 少配置 1.16 MW·h 的储能。以电池储能为例,目前其造价约为 80 ~ 550 万元/MW·h,运行维护成本约为 1.6 ~ 10.4 万元/MW·h^[27-29]。可以看出,储能的投资成本和运维成本都远高于 DR 项目,实施激励型 DR 是提高微电网可靠性的一项经济可行的措施。不过储能系统还具有平抑分布式电源出力波动、减小网损、削峰填谷等作用,是微电网中不可或缺的一个重要装置,如何对储能、分布式电源和需求响应项目进行优化配置以使微电网安全、可靠、经济运行是未来可以深入研究的方向。

6 结论

本文结合微电网和激励型需求响应的特点,将激励型需求响应应用到微电网的负荷削减策略中,建立了激励型需求响应的调度模型和响应模型,并基于蒙特卡洛模拟在改进的 RBTS BUS6 测试系统进行可靠性评估。算例结果表明,激励型需求响应能够有效提高微电网以及整个配电系统的可靠性水平,且重要等级越高的负荷其可靠性提升程度越大。在可靠性水平相同的条件下,实施激励型需求响应的经济成本远低于增大储能容量所需的成本。实施激励型需求响应是促进微电网可靠、经济运行的一个有效措施。

参考文献:

[1] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LV Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.

[2] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报,2014,29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[3] 沈沉,吴翔宇,王志文,等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.

[4] 张晶,孙万珩,王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16): 4070-4076.
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076.

[5] 汤庆峰,刘念,张建华. 计及广义需求侧资源的用户侧自动响应机理与关键问题[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24): 138-147.
TANG Qingfeng, LIU Nian, ZHANG Jianhua. Theory and key problems for automated demand response of user side considering generalized demand side resources [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 138-147.

[6] Kirschen, D. S. Demand-side view of electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 520-527.

[7] 曾博,杨雍琦,段金辉,等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(17): 10-18.
ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and

- research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 10–18.
- [8] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3630–3637.
- NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(22): 3630–3637.
- [9] 赵洪山, 王莹莹, 陈松. 需求响应对配电网供电可靠性的影响[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 49–55.
- ZHAO Hongshan, WANG Yingying, CHEN Song. Impact of demand response on distribution system reliability [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 49–55.
- [10] 陈沧杨, 胡博, 谢开贵, 等. 计入电力系统可靠性与购电风险的峰谷分时电价模型[J]. *电网技术*, 2014, 08: 2141–2148.
- CHEN Cangyang, HU Bo, XIE Kaigui, et al. A peak-valley tou price model considering power system reliability and power purchase risk [J]. *Power System Technology*, 2014, 08: 2141–2148.
- [11] 王冬容. 激励型需求侧响应在美国的应用[J]. *电力需求侧管理*, 2010, 12(1): 74–77.
- WANG Dongrong. Application of incentive demand response in USA [J]. *Power Demand Side Management*, 2010, 12(1): 74–77.
- [12] 肖峻, 李思岑, 王丹. 计及用户分级与互动的配电网最大供电能力模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 19–25.
- XIAO Jun, LI Sicen, WANG Dan. Model of total supply capability for distribution network considering customer classification and interaction [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 19–25.
- [13] PETER Palensky. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2011, 7(3): 381–388.
- [14] 杨彦, 陈皓勇, 张尧, 等. 计及分布式发电和不完全信息可中断负荷选择的电力市场模型[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(28): 15–24.
- YANG Yan, CHEN Haoyong, Zhang Yao, et al. An electricity market model with distributed generation and interruptible load under incomplete information [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(28): 15–24.
- [15] ANGEL Molina-Garcia. Decentralized demand-side contribution to primary frequency control [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 411–419.
- [16] 陈璐, 杨永标, 姚建国, 等. 基于电力积分的需求响应激励机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(18): 82–87.
- CHEN Lu, YANG Yongbiao, YAO Jianguo, et al. Incentive mechanism design for demand response based on power score [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(18): 82–87.
- [17] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [18] 杨旭英, 周明, 李庚银. 智能电网下需求响应机理分析与建模综述[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 220–226.
- YANG Xuying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on demand response mechanism and modeling in smart grid [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 220–226.
- [19] 王蓓蓓, 孙宇军, 李扬. 不确定性需求响应建模在电力积分激励决策中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(10): 93–99.
- WANG Beibei, SUN Yujun, LI Yang. Application of uncertain demand response modeling in power-score incentive decision [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(10): 93–99.
- [20] 钟鸣, 赖威敏. 国内外需求侧响应的研究与实践现状[J]. *贵州电力技术*, 2016, 19(10): 21–24.
- ZHONG Ming, LAI Weimin. Research and practice of demand side response at home and abroad [J]. *Guizhou Electric Power Technology*, 2016, 19(10): 21–24.
- [21] FAHRIOLU, M. Designing incentive compatible contracts for effective demand management [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(4): 1255–1260.
- [22] 张裕, 唐学用, 赵庆明, 等. 全电压等级可靠性评估方法在贵州电网中应用[J]. *贵州电力技术*, 2016, 19(11): 6–10.
- ZHANG Yu, TANG Xueyong, ZHAO Qingming, et al. Research on method of reliability assessment on Guizhou Power grid full voltage level [J]. *Guizhou Electric Power Technology*, 2016, 19(11): 6–10.
- [23] 王杨, 万凌云, 胡博, 等. 基于孤岛运行特性的微电网可靠性分析[J]. *电网技术*, 2014, 38(9): 2379–2385.
- WANG Yang, WAN Lingyun, HU Bo, et al. Isolated island operating characteristics based analysis on reliability of microgrid [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(9): 2379–2385.
- [24] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A Reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6(2): 813–820.
- [25] BILLINTON, R. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1996, 11(4): 1670–1676.
- [26] ALKUHAILI A A, RAGHAVAN S, CHOWDHURY B H. Reliability evaluation of distribution systems containing renewable distributed generations [C]// North American Power Symposium (NAPS), 2012. IEEE, 2012: 1–6.
- [27] 熊雄, 叶林, 杨仁刚. 电力需求侧规模储能容量优化和经济性分析[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(17): 42–48.
- XIONG Xiong, YE Lin, YANG Rengang. Optimal allocation and economic benefits analysis of energy storage system on power demand side [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(17): 42–48.

[28] 梁英. 微电网孤岛模式下负荷分配特性分析及改进[J]. 广东电力,2016,29(6):50-55.
LINAG Ying. Analysis and improvement of load distribution characteristic under micro-grid island mode [J]. Guangdong Electric Power,2016,29(6): 50-55.

[29] 李壮,许欣,齐永志,等. 基于主从结构的微电网系统平滑切换控制策略[J]. 广东电力,2016,29(2):30-35+44.
LI Zhuang,XU Xin,QI Yongzhi,et al. Control strategy for smooth switching of micro-grid system based on master-slave structure

[J]. Guangdong Electric Power,2016,29(2): 30-35+44.

收稿日期:2017-11-29

作者简介:



陈天马(1989),男,硕士研究生,助理工程师。主要从事电力系统运行的研究工作。

(本文责任编辑:范斌)

Analysis of micro grid reliability for considering incentive demand response

CHEN Tianma

(Substation Management,Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,Qingyuan 511518,Guangdong China)

Abstract:In view of the incentive demand response,it can guide users to adjust their electricity consumption and participate in load reduction. The distributed power and energy storage in micro-grid can provide response time for implementing incentive demand response,the paper focus on the reliability evaluation of micro-grid considering incentive demand response. Firstly,the mechanism of incentive demand response and its impact on reliability are analyzed. Secondly,the dispatch model for micro-grid considering customer classification and a customer-response model are developed. Thirdly,the user side response model is set up with the maximum user income as the goal,and the micro-grid load reduction strategy with incentive demand response is proposed. Finally,based on the Monte Carlo simulation method,the reliability evaluation and economic analysis of the modified RBTS Bus6 test system are carried out. The results verify the validity of the model,and prove that the incentive demand response can effectively improve the reliability and economy of the micro-grid. By using the stochastic optimization theory,the optimal decision model for the interruptible load of the power supply company with advance notice selection is studied and the analytical solution of the model is given.

Key words:incentive demand response; micro grid; reliability; load curtailment strategy