

储能装置运行策略及运行特性对微电网可靠性的影响

陈丽丽,牟龙华,许旭锋,刘 爽

(同济大学 电气工程系,上海 201804)

摘要: 储能装置可有效平抑间歇性分布式电源的出力波动,有助于提高系统运行的可靠性。然而,储能装置运行策略和运行特性的选取对系统可靠性水平有着重要影响。搭建了计及储能运行策略和运行特性的、更为精准的储能充放电模型,提出了基于序贯蒙特卡洛模拟法的风/光/柴/储微电网可靠性评估模型,并分别针对负荷点、系统和储能提出了一系列评估指标。通过对 IEEE-RBTS 标准算例系统进行仿真,分析了储能装置的运行策略、容量、最大充放电功率对微电网可靠性水平的影响,并评估了切负荷策略中位置权重系数对负荷点及系统可靠性水平的影响,评估结果可为微电网的优化规划提供有益参考。

关键词: 微电网; 储能; 充放电模型; 切负荷策略; 可靠性指标; 评估模型; 拉丁超立方采样

中图分类号: TM 61; TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.011

0 引言

近年来,随着传统能源的枯竭、气候环境的恶化,世界范围内加快了对绿色清洁能源的研究^[1]。集成了风电、光伏 PV(Photo Voltaic)等分布式电源(DG)及储能装置 ES(Energy Storage)的微电网可有效减少环境污染,提高电力系统的可靠性及灵活性。但 DG 出力的间歇性和波动性会对供电可靠性产生负面影响。另外,以现阶段的技术水平而言,发展微电网在经济上并不占优势,提高微电网的供电可靠性是吸引投资的重要原因^[2]。因此,微电网的广泛应用必须建立在可靠性评估的基础上。

微电网中的储能装置可以有效平抑 DG 的出力波动,提高系统稳定性和可靠性^[3]。储能的运行特性和运行策略对微电网的可靠性有重要影响,国内外学者对这方面的研究相对较少。文献[4]针对含有功率型和能量型储能装置的风电场分别建立了可靠性评估模型,并分析了储能装置的特性参数对风电系统可靠性的影响。文献[5]通过所建立的储能装置充放电模型和成本效益模型,评估了不同储能运行策略对系统可靠性和储能装置经济性的影响。然而,以上研究采用的储能模型均较为理想化,未准确描绘储能装置充放电过程及充放电过程中的能量损耗情况,有必要计及储能装置的自放电率、充放电效率等参数,建立更加精准的储能模型。

可靠性指标研究是微电网可靠性评估的先决条件。可靠性指标可以客观、定量地反映微电网的可靠性水平,凸显微电网的薄弱环节,以便对微电网的

DG 和储能装置进行优化配置。微电网通常以配电网为组网基础,但因其运行控制独具特色,仅仅引用配电系统的可靠性指标来评估微电网的可靠性水平具有局限性,有必要提出针对微电网特性的可靠性指标。

本文首先利用拉丁超立方抽样技术采样风速,利用聂曼法采样太阳辐照度,建立了风机和光伏的出力模型。计及储能运行策略和特性参数的影响,提出了更精准的储能充放电模型,并在放电模型中引入切负荷策略。当储能供电不足时,根据负荷重要程度及距离微电网接入位置远近,施行切负荷策略,实现负荷优化。然后,联合上述 DG 出力模型,提出了基于蒙特卡洛模拟法的微电网可靠性评估模型及方法,并分别针对负荷点、系统和储能装置提出了一系列可靠性评估指标。最后,通过对 IEEE-RBTS 标准算例的仿真,统计计算各类可靠性指标,分析了储能装置的不同充放电策略、不同容量、不同充放电功率限制对微电网可靠性水平的影响,并首次评估切负荷策略中位置权重系数对负荷点及系统可靠性水平的影响,仿真结果显示位置权重影响同类负荷点的被切除概率,表明微电网的优化规划问题需考虑位置权重的影响。

1 微电网模型

为了简化叙述微电网可靠性评估的流程,采用图 1 所示由 DG、储能和负荷构成的简单离网型微电网模型^[6]。其中,DG 包括风机、光伏和柴油发电机(DE)。

1.1 风机出力模型

风速虽具有较强的间歇性和波动性,但仍有规律可循。据统计,双参数 Weibull 分布常用于拟合实际风速,风速 v 的分布函数如下:

$$F(v) = 1 - \exp \left[1 - \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

收稿日期:2016-05-19;修回日期:2017-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407128);上海市科学技术委员会资助项目(12ZR1451300)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407128) and the Shanghai Science and Technology Committee(12ZR1451300)

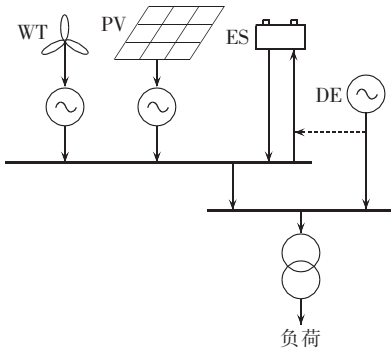


图 1 离网型微电网模型

Fig.1 Model of islanded microgrid

其中, c 为 Weibull 分布的尺寸参数; k 为形状参数。基于历史风速, 运用非线性最小二乘法可拟合出参数 c 和 k 。

可采用拉丁超立方抽样技术^[7]对服从 Weibull 分布的风速进行采样。拉丁超立方抽样技术采样效率高、算法稳健性好, 可确保采样值覆盖随机变量的整个样本空间, 采样出的风速值可更加准确地反映风速的概率分布。

风机出力与风速的函数关系可表示为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}; v \geq v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中, v_{ci} 、 v_r 和 v_{co} 分别为风机的切入、额定和切出风速; P_r 为风机的额定功率。

1.2 光伏出力模型

根据经验并考虑干扰因素(如云朵、阴影等), 将一定时间段内的太阳辐照度近似看成 Beta 分布^[8], 其概率密度函数为:

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

其中, r 和 $r_{\max}$ 分别为这一时间段内的实际太阳辐照度和最大太阳辐照度; α 和 β 为 Beta 分布的形状参数; Γ 为 Gamma 函数。服从 Beta 分布的太阳辐照度可通过聂曼法^[9]进行采样。

光伏出力与太阳辐照度的函数关系可表示为:

$$P_{PV} = rA\xi K \quad (4)$$

其中, A 为电池阵列面积; ξ 为光电转换效率, 单晶硅组件取 14%~15%, 多晶硅组件取 13%~14%; K 为修正系数, 本文参考文献^[10]取 $K=0.5244$ 。

1.3 柴油发电机出力模型

在柴油发电机未发生故障且柴油供应充足的情况下, 其输出功率可控, 本文按其额定功率 P_{DE} 计算其出力。

1.4 负荷模型

据统计, 电力系统负荷通常服从正态分布, 本文中用 7 个分段来模拟正态分布^[11], 每个分段中值负

荷的取值概率为 $p_i (i=1, 2, \dots, 7)$, 如图 2 所示。设 N 为采样规模, 则每个分段中值负荷被采样的个数为 $p_i \times N$, 将 N 个采样值随机组合即可得到负荷预测时间序列值。

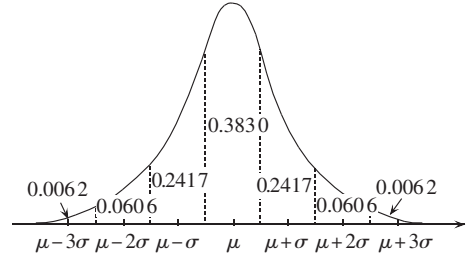


图 2 七分段正态分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of seven-segment normal distribution

正态分布的均值 μ 和方差 σ 可表示为:

$$\begin{cases} \mu = a_{\text{aver}} \times P_{\text{load}}^{\max} \\ \sigma = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{6} \times P_{\text{load}}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中, a_{aver} 、 $a_{\max}$ 和 $a_{\min}$ 分别为某地区年平均、年最大和年最小负荷率, 本文中分别取为 0.8、0.91 和 0.76; $P_{\text{load}}^{\max}$ 为某负荷点的最大负荷值。

1.5 储能装置

储能可有效平抑 DG 的出力波动, 提高系统稳定性和可靠性。本文选用固定型阀控式 (GFM) 铅酸蓄电池作为储能装置, 相比于其他储能技术, 铅酸蓄电池具有不受场地限制、充放电效率和能量密度高等优势, 因而获得了广泛应用。铅酸蓄电池属能量型储能设备, 可以长时间以一个平缓的速度释放能量, 其能量、时间曲线近似呈线性关系。

1.5.1 充放电策略

储能装置的充放电策略是指储能装置的充放电时机, 其应满足系统安全、可靠运行的需求和事先制定的运行规则。本文为储能装置引入 2 种充放电策略。

策略 1: 当 DG 总出力无法满足负荷需求时, 储能装置释放能量参与供电; 否则, 利用所有 DG 的剩余出力存储能量。

策略 2: 当 DG 总出力无法满足负荷需求时, 储能装置释放能量参与供电; 否则, 利用光伏和风机的剩余出力存储能量。

1.5.2 充放电模型

储能装置的充放电模型, 即储能装置功率输出和能量时间序列的求解模型。充放电模型的建立需计及储能充放电策略和储能装置最大充放电功率及容量约束的影响。设 T 为蒙特卡洛仿真总时段数 ($T=N$), 并选取 1 h 作为仿真的最小时间单位。以策略 1 为例, 建立储能模型为:

$$\Delta P(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{DE}(t) - P_{\text{load}}(t) \quad (6)$$

a. 充电模型。

$$P_{\text{ch_max}}(t) = \min \left\{ P_{\text{b_max}}, \frac{[S_{\text{max}} - \text{SOC}(t-1)]E_{\text{B}}}{\eta_{\text{ch}}} \right\} \quad (7)$$

$$P_{\text{batt}}(t) = \begin{cases} \Delta P(t) & 0 \leq \Delta P(t) \leq P_{\text{ch_max}} \\ P_{\text{ch_max}} & \Delta P(t) > P_{\text{ch_max}} \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{\text{temp}}(t) = (1 - \sigma_{\text{batt}})E_{\text{batt}}(t-1) + P_{\text{batt}}(t) \quad (9)$$

$$E_{\text{batt}}(t) = \begin{cases} E_{\text{temp}}(t) & E_{\text{B}}S_{\text{min}} \leq E_{\text{temp}}(t) \leq E_{\text{B}}S_{\text{max}} \\ E_{\text{B}}S_{\text{max}} & E_{\text{temp}}(t) > E_{\text{B}}S_{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{SOC}(t) = \frac{E_{\text{batt}}(t)}{E_{\text{B}}} \quad (11)$$

b. 放电模型。

$$P_{\text{disch_max}}(t) = \min \{ P_{\text{b_max}}, [\text{SOC}(t) - S_{\text{min}}] E_{\text{B}} \eta_{\text{disch}} \} \quad (12)$$

$$E_{\text{temp}}(t) = (1 - \sigma_{\text{batt}})E_{\text{batt}}(t-1) + \Delta P(t) \quad (13)$$

$$P_{\text{batt}}(t) = \begin{cases} \Delta P(t) & -P_{\text{disch_max}} \leq \Delta P(t) \leq 0 \text{ 且} \\ & E_{\text{B}}S_{\text{min}} \leq E_{\text{temp}}(t) \\ \text{切负荷} & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$E_{\text{batt}}(t) = E_{\text{temp}}(t) \quad (15)$$

$$\text{SOC}(t) = E_{\text{batt}}(t) / E_{\text{B}} \quad (16)$$

其中, $t(t=1, 2, \dots, T)$ 为仿真时段, T 为仿真总时段数; $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$ 和 $P_{\text{DE}}(t)$ 分别为时段 t 考虑了强迫停运率的风机、光伏和柴油发电机的实际出力值; $P_{\text{load}}(t)$ 为时段 t 考虑了配电变压器故障率的负荷预测值; $\Delta P(t)$ 为时段 t 微源的剩余出力, 即微源总出力与负荷需求的差值; $P_{\text{ch_max}}(t)$ 、 $P_{\text{disch_max}}(t)$ 分别为时段 t 储能电池最大充、放电功率限制; $P_{\text{batt}}(t)$ 、 $E_{\text{temp}}(t)$ 、 $E_{\text{batt}}(t)$ 和 $\text{SOC}(t)$ 分别为时段 t 储能电池的充放电功率、预估容量、容量和荷电状态; E_{B} 为储能电池额定容量; $P_{\text{b_max}}$ 为储能电池最大充放电功率; S_{max} 、 S_{min} 分别为储能电池最大、最小荷电状态, 本文分别取为 100% 和 20%; η_{ch} 、 η_{disch} 分别为储能电池的充、放电效率, 本文中均取为 0.9; σ_{batt} 为储能电池的自放电率, 本文取为 0.001。

1.5.3 切负荷策略

切负荷策略属负荷优化问题。当所有 DG 与储能电池的总出力不能满足负荷需求时, 需按照负荷重要程度以及负荷点距离微电网接入点的远近, 施行切负荷策略, 以保障微电网安全稳定运行。设切负荷发生在时段 τ 。该问题可描述为:

$$\begin{cases} \max & \sum_{i=1}^m \omega_{1i} \omega_{2i} P_{\text{load}i}(\tau) x_i(\tau) \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^m P_{\text{load}i}(\tau) x_i(\tau) \leq \frac{P_{\text{out}}(\tau)}{1+\delta} \\ & x_i(\tau) = 0 \text{ 或 } 1 \quad i=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (17)$$

其中, m 为微电网内负荷点的个数; $x_i(\tau)$ 为时段 τ 负荷点 i 在优化问题中的自变量, 取值 0 代表负荷点 i 被切除, 取值 1 代表未被切除; $P_{\text{out}}(\tau)$ 、 $P_{\text{load}i}(\tau)$ 分别为时段 τ DG 总出力、负荷点 i 的负荷需求; δ 为网损率, 本文中取为 5%; ω_{1i} 、 ω_{2i} 为负荷点的权重系数, 分别对应于负荷点的重要程度和距离微电网的远近。

参考文献[12], 一、二、三类负荷的单位权重 ω_{1i} 分别取为 100、10、1; 位置权重 $\omega_{2i} = 1/d_i$, d_i 为负荷点与微电网接入点的电气距离, d_i 大小与微电网结构有关, 与支路长度无关, 相邻两负荷点的电气距离为 1。

负荷优化后, 重新计算时段 τ DG 的剩余出力 $\Delta P(\tau) = P_{\text{out}}(\tau) - \sum P_{\text{load}i}(\tau) x_i(\tau)$, 易得 $\Delta P(\tau) \geq 0$, 从而储能装置从切负荷状态进入充电状态, 根据充电模型可得该时段储能装置的充放电功率、容量和荷电状态大小。

2 微电网可靠性评估模型

2.1 DG 及配电元件的可靠性模型

风机、光伏和柴油发电机的运行状态均采用两状态模型描述, 即正常工作状态和故障状态。风机和光伏正常工作时按式(2)和式(4)计算出力, 柴油发电机正常工作时按其额定功率计算出力; 故障时 DG 出力均为 0。配电元件主要包括馈线、隔离开关、熔断器和配电变压器等, 本文中假定馈线、隔离开关和熔断器均 100% 可靠工作。将配电变压器看作可修复元件, 选用两状态模型: 配电变压器正常工作时, 其直连负荷点的负荷大小等于负荷预测值; 故障时负荷大小为 0。假设各 DG 和配电变压器的无故障工作时间 MTTF_i 和修复时间 MTTR_i 均服从指数分布, 即各自的故障率 λ_i 和修复率 μ_i 均为常数^[13], 则 DG 和配电变压器的可靠性模型建立如下:

$$\begin{cases} \tau_{i1} = -\lambda_i^{-1} \ln u_1 = -\text{MTTF}_i \ln u_1 \\ \tau_{i2} = -\mu_i^{-1} \ln u_2 = -\text{MTTR}_i \ln u_2 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

其中, τ_{i1} 、 τ_{i2} 分别为各 DG 和配电变压器的正常工作状态持续时间、修复时间; u_1 、 u_2 为区间 $[0, 1]$ 上服从均匀分布的随机数; n 为 DG 和配电变压器的总个数。

在仿真总时段 T 内抽样 m 个配电变压器的运行、停运状态, 即可构成一个 $m \times T$ 阶负荷点状态矩阵 $\mathbf{X}$, $X(i, j) = 0$ 表示负荷点 i 在时段 j 因配电变压器故障被切除; $X(i, j) = 1$ 表示负荷点 i 未被切除。仿真过程中, 若在时段 τ 由于供电不足施行了切负荷策略, 则按负荷优化结果 $x_i(\tau)$ 更新 $\mathbf{X}$ 中时段 τ 的状态, 即:

$$X(i, \tau) = x_i(\tau) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (19)$$

2.2 可靠性评估指标

可靠性评估的关键是可靠性指标的选取及其统计计算。由于微电网的组网、控制策略和运行方式均有别于传统配电网, 直接套用配电网的可靠性指标评估微电网的可靠性水平不尽合理, 有必要针对微电网的特性提出相应的可靠性评估指标, 以便从不同角度客观、定量地反映微电网的可靠性水平, 从而方便 DG 和储能的优化配置。

2.2.1 负荷点可靠性指标

配电变压器发生故障或微电网供电不足时, 负

荷点均有可能被切除。为了评估每个负荷点的可靠性水平,定义负荷点 i 在 $[0, T]$ 被切除的概率 $p_{\text{cut}i}$ 为:

$$P_{\text{cut}i} = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T X(i, t) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (20)$$

2.2.2 系统可靠性指标

(1)若已知微电网内各个负荷点被切除的概率 $p_{\text{cut}i}$,为了评估微电网供电的充裕度,定义系统期望负荷损失指标 E_{SELL} 为:

$$E_{\text{SELL}} = \sum_{i=1}^m p_{\text{cut}i} P_{\text{load}i}^{\max} \quad (21)$$

其中, $P_{\text{load}i}^{\max}$ 为负荷点 i 的峰值负荷。

(2)将系统停电时间与供电时间的比值^[14]定义为系统负载缺电时间概率 T_{LSP} :

$$T_{\text{LSP}} = n_{\text{shed}} / T \quad (22)$$

其中, n_{shed} 为切负荷策略执行次数,即微电网出现供电不足的时段数。

(3)将负荷缺电量与负荷正常运行 T 个时段耗电量的比值定义为系统负荷缺电率 L_{LSP} :

$$L_{\text{LSP}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m P_{\text{load}i}(t) X(i, t)}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m P_{\text{load}i}(t)} \quad (23)$$

(4)兼顾系统供电不足时间、失负荷量,定义系统可靠性水平指标 λ_{LSP} 来衡量微电网供电可靠性水平。

$$\lambda_{\text{LSP}} = (1 - T_{\text{LSP}})(1 - L_{\text{LSP}}) \quad (24)$$

2.2.3 储能相关可靠性指标

(1)将总时段数 T 内储能电池平均每次放电量与额定容量的比值定义为平均放电深度指标 λ_{ADD} :

$$\lambda_{\text{ADD}} = \frac{1}{E_B N_{\text{disch}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{disch}}} E_{\text{disch}}(i) \quad (25)$$

其中, N_{disch} 为总放电次数; $E_{\text{disch}}(i)$ 为每次放电量。

(2)离网型微电网中的储能电池作为主控微源采用 V/f 控制,为微电网提供电压和频率参考^[15]。但储能电池的调压、调频能力受荷电状态的影响,仅当储能电池保持较高荷电状态时,微电网的电压和频率才能维持稳定。定义平均荷电状态指标 SOC_A 为:

$$\text{SOC}_A = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \text{SOC}(t) \quad (26)$$

2.3 基于序贯蒙特卡洛法的可靠性评估流程

2.3.1 可靠性评估主要步骤

微电网可靠性评估的步骤如下。

a. 基于历史风速和辐照度,运用最小二乘法拟合 Weibull 和 Beta 分布的参数。

b. 利用拉丁超立方抽样技术采样风速,运用聂曼法采样辐照度,采用 Gram-Schmite 序列正交化方法对风速和辐照度采样值排序,降低采样值间相关性。

c. 考虑强迫停运率,抽样风机、光伏和柴油发电机的运行、停运状态。结合各自出力模型,计算 DG 实际出力时间序列。

d. 按负荷模型计算负荷预测时间序列值。

e. 计算剩余出力 $\Delta P(t)$ 和预估容量 $E_{\text{temp}}(t)$,根据 $\Delta P(t)$ 大小判断储能电池充放电状态,然后对应储能充电或放电模型计算充放电功率、容量和荷电状态。当微电网供电不足时,施行切负荷策略,重新计算储能的充放电功率、容量和荷电状态,并将被切除负荷点的状态更新到负荷状态矩阵 X 中。

f. 进行 T 个时段的序贯蒙特卡洛仿真,统计并计算可靠性指标。

2.3.2 可靠性评估流程

基于序贯蒙特卡洛模拟法的微电网可靠性评估流程如图 3 所示。

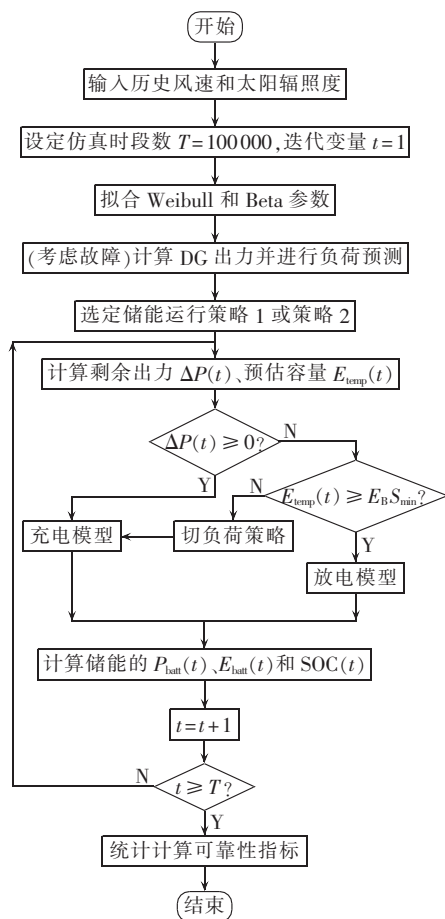


图 3 微电网可靠性评估流程图

Fig.3 Flowchart of microgrid reliability evaluation

3 算例分析

3.1 测试系统

本文在 IEEE-RBTS 系统^[16-17]主馈线 F_4 的分支线 25 处配置了一个风/光/柴/储微电网,该微电网包括风机、光伏、柴油发电机各 1 台,容量分别为 2 MW、0.6 MW、0.8 MW;配备了 1 套储能装置,容量为 1 MW·h,最大充放电功率为 0.2 MW。修改后测试系统的结构如图 4 所示。

该测试系统包括 30 条线路、23 个负荷点、23 个熔断器、23 台配电变压器、4 个断路器和 1 个隔离开

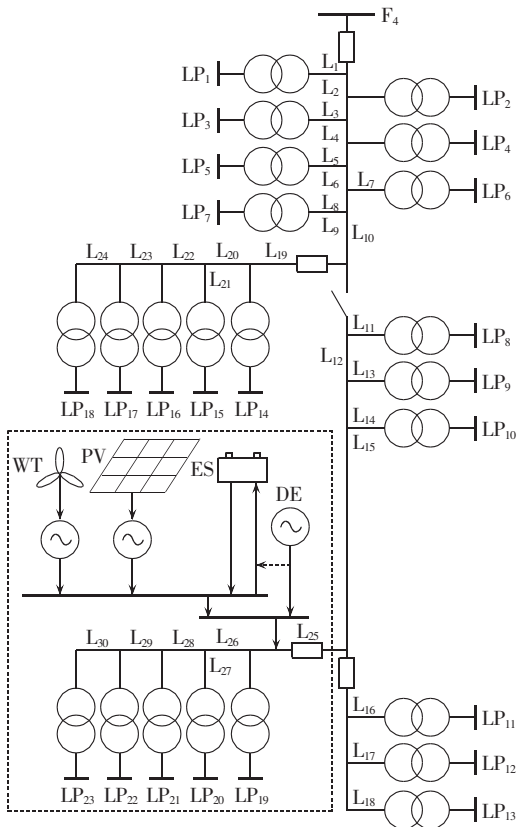


图 4 IEEE-RBTS 测试系统
Fig.4 IEEE-RBTS test system

关。各设备的原始数据、负荷数据分别见表 1、表 2，原始风速和太阳辐照度参见文献[18]。设断路器和熔断器 100%可靠工作，隔离开关操作时间为 0.5 h。

表 1 设备的可靠性指标

Table 1 Reliability parameters of equipments					
设备类型	故障率/%	平均修复时间/h	设备类型	故障率/%	平均修复时间/h
风机	0.052	80	柴油发电机	0.105	50
光伏	0.052	80	配电变压器	0.020	30

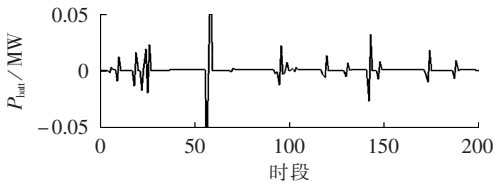
表 2 负荷数据
Table 2 Load data

编号	类型	用户数	负荷/MW	ω_{li}	ω_{2i}
LP ₁₉	一类	79	0.1554	100	1
LP ₂₀	二类	1	0.1929	10	1/2
LP ₂₁	三类	1	0.2831	1	1/3
LP ₂₂	三类	76	0.1585	1	1/4
LP ₂₃	三类	1	0.2101	1	1/5

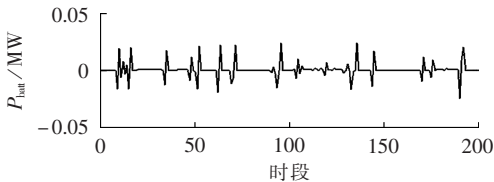
3.2 储能充放电策略对可靠性的影响

2 种充放电策略下储能的出力情况如图 5 所示，可靠性指标如表 3 所示。

观察表 3 和图 5 可发现，不同的储能运行策略对微电网可靠性指标影响虽然不大，但是运行在策略 2 下的储能装置需要更加频繁地充放电，可能会影响储能装置的使用寿命。主要由于策略 1 尽量使用 DG 出力满足负荷需求，供电不足的部分由储能电池平抑，储能主要致力于提升系统可靠性；策略 2 主要将



(a) 策略 1 下的储能出力情况



(b) 策略 2 下的储能出力情况

图 5 2 种策略下储能出力情况
Fig.5 ES power output of two strategies

表 3 2 种策略下的可靠性指标

Table 3 Reliability indices for two strategies					
指标	策略 1	策略 2	指标	策略 1	策略 2
E_{SEIL}/MW	0.0253	0.0259	λ_{LISP}	0.9454	0.9436
T_{LISP}	0.0302	0.0313	λ_{ADD}	0.0143	0.0143
L_{LISP}	0.0253	0.0260	SOC_A	0.9975	0.9973

储能装置作为平滑间歇性 DG (风机和光伏) 出力波动的手段，储能主要致力于平衡间歇性 DG 的渗透率，因而需要频繁地充放电，长此以往，会降低储能装置的使用寿命。从提升系统可靠性水平和延长储能装置使用寿命的角度来看，策略 1 优于策略 2。

3.3 储能容量和充放电功率对可靠性的影响

储能装置的特性参数主要包括容量和最大充放电功率。以策略 1 为例，为了评估储能特性参数对微电网可靠性的影响，维持测试系统其他参数不变，计算微电网在不同储能参数下的可靠性指标。 λ_{LISP} 随储能容量、充放电功率改变而变化的情况分别见图 6、7。

观察图 6、7 可知，微电网的可靠性水平随储能容量和最大充放电功率增加而提高。策略 1 下储能电

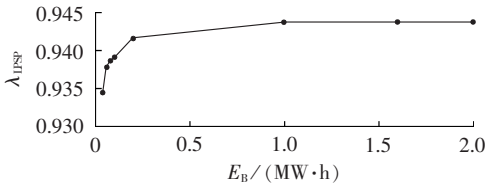


图 6 不同储能容量下 λ_{LISP} 变化情况
Fig.6 Curve of λ_{LISP} vs. ES capacity

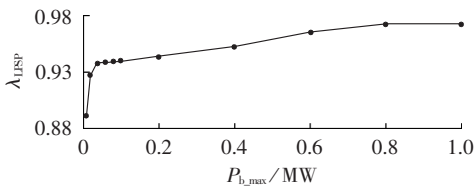


图 7 不同储能最大充放电功率下 λ_{LISP} 变化情况
Fig.7 Curve of λ_{LISP} vs. maximal ES charging/discharging power

池主要用于填补负荷缺额,储能容量和充放电功率越大,则填补缺额的能力越强,因此增加储能容量或提高充放电功率均有助于提高微电网的可靠性水平。

然而,当储能容量、充放电功率超过某值(分别为 $1\text{ MW}\cdot\text{h}$ 和 0.8 MW)时,可靠性水平改善较小。联系实际情况,储能电池容量越大或充放电功率越高,设备的制造难度就越大,造价也越昂贵。因此需根据微电网规模和实际负荷需求对储能装置进行优化配置。

3.4 位置权重 ω_{2i} 对负荷点可靠性的影响

微电网具有优先为高等级负荷供电和就近供电的特点。微电网接入不同分支线时,与各负荷点间电气距离改变,位置相关权重系数 ω_{2i} 的变化情况如表 4 所示,将各行权重系数 ω_{2i} 分别代入切负荷策略式(17),评估微电网接入位置对负荷点及系统可靠性的影响。评估结果如表 5 所示。

表 4 位置权重系数 ω_{2i}
Table 4 Position-weight coefficient ω_{2i}

接入点	位置权重系数 ω_{2i}				
	LP ₁₉	LP ₂₀	LP ₂₁	LP ₂₂	LP ₂₃
L ₂₅	1	0.5	0.33	0.25	0.2
L ₂₆	1	1	0.5	0.33	0.25
L ₂₈	0.5	1	1	0.5	0.33
L ₂₉	0.33	0.5	1	1	0.5
L ₃₀	0.25	0.33	0.5	1	1

表 5 不同接入点的 $p_{\text{cut}i}$ 和 λ_{LSP}
Table 5 $p_{\text{cut}i}$ and λ_{LSP} for different integrating points

接入点	负荷点切除概率 $p_{\text{cut}i}$					λ_{LSP}
	LP ₁₉	LP ₂₀	LP ₂₁	LP ₂₂	LP ₂₃	
L ₂₅	0.015 1	0.020 6	0.028 9	0.026 7	0.030 6	0.945 3
L ₂₆	0.015 1	0.020 6	0.028 9	0.026 6	0.030 7	0.945 3
L ₂₈	0.015 1	0.020 6	0.028 9	0.026 4	0.030 9	0.945 3
L ₂₉	0.015 1	0.020 6	0.028 9	0.026 4	0.030 9	0.945 3
L ₃₀	0.015 1	0.020 6	0.030 9	0.028 4	0.026 9	0.945 2

观察表 5 可知,位置因素对整个微电网的可靠性水平影响较小;位置权重 ω_{2i} 几乎不影响一类和二类负荷点的被切除概率,主要影响三类负荷点(LP₂₁—LP₂₃)的可靠性水平,与微电网间电气距离最短的负荷点的可靠性指标相对最优。易得,位置权重 ω_{2i} 在确定同等级负荷点被切除的先后顺序上可发挥主导作用。为了最大限度地降低微电网的负荷损失指标,可兼顾负荷点重要程度及位置因素的影响,对微电网进行优化选址。

4 结论

a. 本文计及储能运行策略和运行特性建立了储能充放电模型,构建了基于序贯蒙特卡洛模拟法的风/光/柴/储微电网的可靠性评估模型。用修改后的 IEEE-RBTS 作为测试系统,比较储能装置在不同充放电策略、不同容量和不同充放电功率限制下微电网

可靠性水平的变化情况。分析了切负荷策略中位置权重系数对负荷点及系统可靠性水平的影响情况。

b. 算例结果表明:储能装置按不同充放电策略运行时,微电网呈现不同的可靠性水平。需综合考虑储能装置对寿命和微电网对可靠性水平的具体要求,选择合理的储能运行策略。

c. 微电网的可靠性水平随储能容量和充放电功率限制的提高而提高。但过高的储能容量或充放电功率对可靠性水平改善甚微,配置成本却急剧上升。亟待提出储能相关的经济性指标作为优化目标,指导微电网的优化规划。

d. 位置权重对可靠性水平指标影响甚微,主要用于决定同等级负荷点被切除的先后顺序,可为微电网的优化规划提供有益参考。

参考文献:

[1] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of micro-grid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.

[2] 刘仲, 牟龙华, 许旭锋. 微电网黑启动中考虑负荷恢复优化的分布式电源恢复方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 46-52.
LIU Zhong, MU Longhua, XU Xufeng. Microgrid black-start considering DG startup sequence and load restoration optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 46-52.

[3] 杨占刚, 徐玉磊, 王成山, 等. 光储微电网运行特性及影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(10): 15-20.
YANG Zhangang, XU Yulei, WANG Chengshan, et al. Operating characteristics and influencing factors of photovoltaic-storage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 15-20.

[4] 孟虹年, 谢开贵. 计及电池储能设备运行特性的风电场可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 214-219.
MENG Hongnian, XIE Kaigui. Wind farm reliability evaluation considering operation characteristics of battery energy storage devices[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 214-219.

[5] 谢开贵, 王岸, 胡博. 计及储能设备运行策略的风/柴/储混合系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 1-7.
XIE Kaigui, WANG An, HU Bo. Reliability evaluation of wind-diesel-storage hybrid system considering energy storage system operating strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 1-7.

[6] 菲美琴, 周松林, 苏建徽. 基于风光联合概率分布的微电网概率潮流预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 55-63.
MAO Meiqin, ZHOU Songlin, SU Jianhui. Probabilistic power flow forecasting of microgrid based on joint probability distribution about wind and irradiance[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 55-63.

[7] OWEN A B. Controlling correlations in Latin hypercube samples[J]. Journal of the American Statistical Association, 1994, 89(428): 1517-1522.

[8] 王敏. 分布式电源的概率建模及其对电力系统的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

- WANG Min. The probability modeling of distributed generation and its influence on power systems[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2010.
- [9] 贺芳芳,顾旭东,徐家良. 20世纪90年代以来上海地区光能资源变化研究[J]. 自然资源学报,2006,21(4):559-566.
- HE Fangfang, GU Xudong, XU Jialiang. Studies on radiation resources change in Shanghai since the 1990's[J]. Journal of Natural Resources,2006,21(4):559-566.
- [10] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 基于随机模型的光伏发电置信容量评估方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):32-37.
- LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Probabilistic models based evaluation model for capacity credit of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(13):32-37.
- [11] 陈凡,刘海涛,黄正,等. 基于改进 k -均值聚类的负荷概率模型[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(22):128-133.
- CHEN Fan, LIU Haitao, HUANG Zheng, et al. Probabilistic load model based on improved k -means clustering algorithm [J]. Power System Protection and Control,2013,41(22):128-133.
- [12] 赵渊,何媛,宿晓岚,等. 分布式电源对配网可靠性的影响及优化配置[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):13-20.
- ZHAO Yuan, HE Yuan, SU Xiaolan, et al. Effect of distributed generation on power distribution system reliability and its optimal allocation[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):13-20.
- [13] 王剑,李兴源,刘天琪. 风电场及储能装置对发输电系统可靠性的影响[J]. 电网技术,2011,35(5):165-170.
- WANG Jian, LI Xingyuan, LIU Tianqi. Influence of connecting wind farms and energy storage devices to power grid on reliability of power generation and transmission system[J]. Power System Technology,2011,35(5):165-170.
- [14] 朱兰,严正,杨秀,等. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术,2012,36(12):26-31.
- ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology,2012,36(12):26-31.
- [15] 陈丽丽,牟龙华,刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(12):86-91.
- CHEN Lili, MU Longhua, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control,2015,43(12):86-91.
- [16] ZHENG K, ZHANG J H, LIU W X. Distribution network reliability considering complementary distribution generation with wind and photovoltaic powers[C]//2010 5th International Conference on Critical Infrastructure(CRIS). [S.l.]:IEEE,2010:1-5.
- [17] 刘传铨,张焰. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化,2008,31(22):46-49.
- LIU Chuanquan, ZHANG Yan. Distribution network reliability considering distribution generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,31(22):46-49.
- [18] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1996,11(4):1670-1676.

作者简介:



陈丽丽

陈丽丽(1992—),女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为微电网运行与可靠性(E-mail:1433308@tongji.edu.cn);

牟龙华(1963—),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网、电能质量(E-mail:lhmu@tongji.edu.cn);

许旭锋(1981—),男,浙江绍兴人,工程师,博士,主要研究方向为微电网可靠性、电力系统优化(E-mail:xfxu@tongji.edu.cn);

刘爽(1992—),女,河北衡水人,博士研究生,研究方向为微电网运行与可靠性(E-mail:ls_382@163.com)。

Influences of energy storage operational strategy and characteristic on microgrid reliability

CHEN Lili, MU Longhua, XU Xufeng, LIU Shuang

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Since ES(Energy Storage) is used to smooth the power output fluctuations of intermittent DG(Distributed Generation) for enhancing the operational reliability of power system, the selection of its operational strategy and characteristic influences the power system reliability level significantly. A more accurate ES charging/discharging model considering its operational strategy and characteristic is established, a reliability evaluation model based on the sequential Monte Carlo simulation method is proposed for microgrid with wind turbine, PV, diesel generator and ES, and the evaluation indices for load point, microgrid system and ES are given respectively. Simulation is carried out for IEEE-RBTS standard system, the influences of ES operational strategy, capacity and maximal charging/discharging power on the microgrid reliability level are analyzed, and the impact of position-weight coefficient of load shedding strategy on the reliability levels of load point and microgrid system is evaluated. The simulative results provide useful reference for the optimal microgrid planning.

Key words: microgrid; energy storage; charging/discharging model; load shedding strategy; reliability indices; evaluation model; Latin hypercube sampling