

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181507

基于电动汽车最小高峰负荷模型的微电网可靠性分析

陈旭¹, 叶琳浩¹, 黄廷城², 江浩侠², 陈家超¹

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广东 广州 510670; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 电动汽车充电时间灵活、调控性能好, 可作为一种可控负荷参与微电网的负荷调节, 从而避免微电网孤岛运行时发电量不足而切负荷。基于此, 重点研究了计及电动汽车充电控制策略的微电网可靠性分析。首先, 建立了电动汽车最小高峰负荷模型, 以评估微电网孤岛运行时电动汽车的调控潜力。紧接着, 基于最小高峰负荷模型, 提出了计及供电可靠性的电动汽车-储能联合调控策略。然后, 基于蒙特卡洛模拟法, 提出了计及电动汽车-储能联合调控策略的微电网可靠性评估方法。最后, 通过改进的 RBTS Bus6 F4 馈线系统进行算例仿真。仿真结果验证了所提模型和策略的有效性。算例结果表明, 所提的微电网调控策略能在满足电动汽车充电需求的基础上, 有效降低电动汽车接入对微电网可靠性的影响。

关键词: 电动汽车; 联合调控; 微电网; 可靠性; 高峰负荷

Reliability evaluation of microgrid based on minimum peak load model of electric vehicle

CHEN Xu¹, YE Linhao¹, HUANG Tingcheng², JIANG Haoxia², CHEN Jiachao¹

(1. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510670, China;

2. Guangzhou Power Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: The electric vehicle has flexible charging time and good regulation performance. As a controllable load, the electric vehicle can participate in the load regulation of the microgrid, thereby avoiding the removal of the load due to insufficient power generation during the operation of the micro-grid island. This paper focuses on the reliability analysis of microgrids that take into account the charging control strategy of electric vehicles. Firstly, the minimum peak load model of electric vehicles is established to evaluate the regulation potential of electric vehicles in the microgrid operation period. Secondly, based on the minimum peak load model, an electric vehicle-energy storage joint regulation strategy considering power supply reliability is proposed. Thirdly, based on the Monte Carlo simulation method, a microgrid reliability assessment method considering the electric vehicle-energy storage combined regulation strategy is proposed. Finally, a numerical simulation is carried out through the modified RBTS Bus6 F4 feeder system. Simulation results verify the effectiveness of the proposed model and strategy. The results of the example show that the proposed microgrid regulation strategy can effectively reduce the impact of large-scale electric vehicle access on the reliability of microgrid on the basis of meeting the charging demand of electric vehicles.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. ZBKJXM20160003).

Key words: electric vehicle; combined control; microgrid; reliability; peak load

0 引言

并网型微电网可在外部电网故障或出现电能质量问题时断开与外部电网的连接, 进入孤岛运行模式, 由微电网内部分布式电源(Distributed Generation, DG)和储能联合供电, 以避免负荷受到来自外部电网

的干扰, 提高供电可靠性和电能质量^[1-2]。为保证孤岛运行时负荷的可靠用电, 微电网需配置足够容量的 DG 和储能^[3]。在当前储能成本高昂的情况下, 通过需求侧资源的合理调控来降低微电网 DG 和储能配置容量^[4], 是提升微电网可靠性和经济性的一项行之有效的措施^[5]。

电动汽车(Electric Vehicle, EV)闲置时间长、充电的时空特性灵活^[6], 是微电网中可调控性强的需

求侧资源之一。且随着能源危机的日益加重及充换电设施的逐步完善,节能环保的EV有望取代传统能源汽车。当EV数量达到一定规模后,可通过负荷聚集商(Load Aggregator, LA)的经济激励手段^[7],将一个区域内的EV聚合起来共同参与电网的调控,如文献[8]利用EV的移动储能特性,调控EV以平抑直流微电网的母线电压波动;文献[9]通过EV与可再生能源发电的协调控制,实现微电网整体经济性和环境效益的提升;文献[10]调控EV参与电力系统频率调节。

供电可靠性可反映电网和用户停电次数、时间和损失负荷量,是电网的重要运行指标。国内外学者对电动汽车以及供电可靠性的研究经历了两个阶段,一是研究大规模EV接入配电网对供电可靠性的影响,EV主要通过增大电力负荷需求、改变负荷时空分布、增大设备过载风险等方式影响配电网可靠性^[11]。在此阶段的研究基础上,部分学者提出EV充放电控制或EV与荷-储联合调控策略来降低EV大量接入对配电网可靠性的影响,乃至在特定场景下提升供电可靠性,如:文献[12]将EV等效为备用电源,提出电动汽车接入电网(Vehicle-to-Grid, V2G)模式下的配电网可靠性评估算法,可提升配电网局部的可靠性水平;文献[13]将电动汽车和DG、文献[14]将电动汽车、DG和储能组成联合发电系统,进行含EV的配电网可靠性量化评估。总体而言,当前相关研究在配电网可靠性评估时大多仅考虑EV作为移动储能的电源作用,较少研究EV作为可控负荷对供电可靠性的影响。而通过电价或经济激励等手段对负荷进行合理调控可有效提升供电可靠性^[5,15],尤其是在微电网中,有效利用可控负荷可减少微电网DG和储能配置容量,提升微电网的可靠性和经济性^[16-17]。但当前尚未有关于微电网可靠性评估中EV负荷调节潜力和调控策略的研究。

因此,本文重点研究计及EV负荷调控潜力和策略的微电网可靠性评估。首先,建立电动汽车最小高峰负荷模型,以对微电网孤岛运行时段内的EV调控潜力进行评估;接着,提出了计及供电可靠性的微电网EV-储能调控策略,对孤岛运行时微电网内部EV(可控负荷)和储能进行联合调控;然后,基于蒙特卡洛模拟,提出了基于EV最小高峰负荷模型微电网可靠性评估方法;最后,通过改进的RBTS Bus6 F4馈线系统进行算例仿真。仿真结果验证了所提模型和策略的有效性。在满足EV充电需求的基础上,根据所提的微电网联合调控策略对EV和储能进行调控,可有效降低大规模EV接入对微电网可靠性的影响,提高微电网可靠性。

1 电动汽车最小高峰负荷模型

孤岛运行时,微电网负荷完全由DG和储能供电。在微电网由并网模式切换为孤岛模式时,若发电量不足以供应全部负荷,则需切除部分负荷。由于EV充电时间灵活,可在满足其充电需求的情况下优先切除EV充电负荷。同时,由于微电网需等外部电网故障修复或转供电才能恢复并网运行,所以需对整个孤岛运行时段内EV负荷调控潜力进行评估。

为此,本章建立了电动汽车最小高峰负荷模型,以评估孤岛运行时段内,在满足EV充电需求的基础上,经过调控后EV高峰负荷所能达到的最小值,如式(1)所示。

$$\min f = \max(AP) \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1(N-1)} & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2(N-1)} & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots & \vdots \\ a_{(J-1)1} & a_{(J-1)2} & \cdots & a_{(J-1)(N-1)} & a_{(J-1)N} \\ a_{J1} & a_{J2} & \cdots & a_{J(N-1)} & a_{JN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P = [P_1^{EV} \quad P_2^{EV} \quad \cdots \quad P_N^{EV}]^T \quad (3)$$

$$J = \left\lceil \frac{T_k}{\Delta t} \right\rceil \quad (4)$$

式(1)~(4)中: A 为EV充电状态矩阵; P 为EV充电功率矩阵; a_{ij} 为表征第*i*个时间段第*j*辆EV充电状态的0-1变量,1表示充电,0表示非充电状态; N 为EV数量; J 为调控时间段的总数量; T_k 为微电网孤岛运行时间,即EV调控时长; Δt 为调控时间间隔; P_j^{EV} 为第*j*辆EV的充电功率。

同时,LA对EV的调控需满足车主的充电需求,在对EV进行调控时,需获取EV充电计划信息,包括:当前电池荷电状态 S^{oc1} (State of Charge, SOC)、当前时刻 T^1 、预计离开时刻 T^2 、离开时期望的荷电状态 S^{oc2} 、电池容量 B 、充电功率 P^{EV} 。根据充电计划信息,可得出EV充电需求约束如下。

1) 电动汽车充电量约束

在EV调控时段内,电动汽车充电量应不小于其在调控时段内的最小需充电量,且充电后的电量不大于其容量上限值。

$$(S_j^{oc3} - S_j^{oc1})B \leq \sum_{i=1}^J a_{ij} \Delta t P_j^{EV} \leq (S_j^{\max} - S_j^{oc1})B \quad (5)$$

式中: S_j^{oc1} 表示第*j*辆EV在开始调控时的SOC状态; S_j^{\max} 表示*j*辆EV的SOC上限值,避免EV过

充; $S_j^{\text{oc}3}$ 表示第 j 辆 EV 在调控时段内至少需达到的 SOC 状态。

$S_j^{\text{oc}3}$ 取决于该辆 EV 的预计离开时刻 T_j^2 , 若 EV 在孤岛运行时段内离开, 则 $S_j^{\text{oc}3} = S_j^{\text{oc}2}$ 。若 EV 在孤岛运行结束后离开, 则 $S_j^{\text{oc}3}$ 等于 $S_j^{\text{oc}2}$ 与 EV 在孤岛结束后可充电量之差, 如式(6)所示。

$$S_j^{\text{oc}3} = \begin{cases} S_j^{\text{oc}2} & \text{if } T_j^2 \leq T_K \\ S_j^{\text{oc}2} - \frac{(T_j^2 - T_K)P_j^{\text{EV}}}{B} & \text{if } T_j^2 > T_K \end{cases} \quad (6)$$

2) 电动汽车充电时间约束

在 EV 离开电网后, 其充电状态变量 a_{ij} 均为 0。

$$\text{if } i \geq T_j^2, a_{ij} = 0 \quad (7)$$

上述模型可通过 GAMS 优化软件进行求解, 求解可得到孤岛时段内最小 EV 高峰负荷值 P_{\min}^p , 作为微电网进入孤岛时的切负荷判据。

2 计及供电可靠性的微电网调控策略

在微电网运行过程中, DG 出力、负荷、接入电网的 EV 数量及充电功率都会随时间而变化^[18], 上述最小高峰负荷模型求解结果未考虑后续时段的变化, 不能用于微电网孤岛运行过程中的 EV 充电控制。因此, 本节考虑 DG、负荷和 EV 的时变性, 提出计及微电网可靠性的 EV 和储能联合调控策略。

2.1 EV-储能功率约束

在孤岛运行的任意时刻 t , 微电网都需满足电功率供需平衡, 即

$$P^{\text{DG}}(t) - P^{\text{L}}(t) - P^{\text{loss}}(t) = P^{\text{EV}}(t) + P^{\text{ESS}}(t) \quad (8)$$

式中: P^{DG} 为 DG 发电功率; P^{L} 为常规负荷功率; P^{loss} 为微电网总网损功率; P^{EV} 为所有 EV 的充电功率; P^{ESS} 为储能功率, $P^{\text{ESS}} > 0$, 表明储能充电, 反之表明储能放电。

令 $D(t) = P^{\text{DG}}(t) - P^{\text{L}}(t) - P^{\text{loss}}(t)$, 则 EV 和储能的总功率需与 $D(t)$ 实时平衡。

同时, 为满足 EV 用户的充电需求, EV 充电功率需满足

$$P_{\min}^p(t) \leq P^{\text{EV}}(t) \leq \sum P_i^{\text{EV}}(t) \quad (9)$$

式中: P_{\min}^p 为 EV 最小高峰负荷值, 由上节所建的最小高峰负荷模型求解得到; $\sum P_i^{\text{EV}}(t)$ 表示时刻 t 所有可充电 EV 的充电功率之和。

储能系统的功率需满足以下约束

$$-P_{\max}^{\text{ESS}} \leq P^{\text{ESS}}(t) \leq P_{\max}^{\text{ESS}} \quad (10)$$

式中, P_{\max}^{ESS} 为储能最大充放电功率的绝对值。

式(8)一式(10)构成了 EV-储能联合调控过程中的功率约束。

2.2 EV-储能调控策略

EV-储能功率约束仅限定了功率的区间范围, 无法得出 EV 和储能具体功率, 尤其当 DG 输出功率大于所有负荷需求及网损时, 盈余功率在 EV 和储能之间如何分配难以确定。因此, 本节计及微电网供电可靠性, 以尽可能避免微电网孤岛运行时切除负荷为原则, 提出 EV-储能调控策略, 如下所示。

情形一: 在孤岛运行的任意时刻 t , 若 DG 输出功率 \leq 常规负荷、网损及 EV 基本充电需求之和, 即 $D(t) \leq P_{\min}^p(t)$, 则储能需放电以维持功率平衡。为避免储能输出功率不足而导致切负荷, EV 按基本充电需求进行充电, 即 $P^{\text{ESS}}(t) = P_{\min}^p(t)$ 。

1) 若此时储能最大放电功率 P_{\max}^{ESS} 不足以供应负荷, 即 $D(t) < P_{\min}^p(t) - P_{\max}^{\text{ESS}}$, 或储能可用容量 $Q_{\text{re}}(t)$ 不足维持接下来 Δt 时段的供电需求, 即 $Q_{\text{re}}(t) < [P_{\min}^p(t) - D(t)]\Delta t$, 则需根据功率缺额切除部分负荷。

2) 若储能最大放电功率能供应负荷, 即 $D(t) \geq P_{\min}^p(t) - P_{\max}^{\text{ESS}}$, 且储能可用容量可维持接下来 Δt 时段的供电需求, 即 $Q_{\text{re}}(t) \geq [P_{\min}^p(t) - D(t)]\Delta t$, 则该时段内, 储能放电功率可根据式(11)计算得出, 如下式所示。

$$P^{\text{ESS}}(t) = P^{\text{DG}}(t) - P^{\text{L}}(t) - P_{\min}^p(t) - P^{\text{loss}}(t) \quad (11)$$

情形二: 若 DG 输出功率大于常规负荷、网损及 EV 基本充电需求之和, 即 $D(t) > P_{\min}^p(t)$, 则盈余发电功率可分配给其余 EV 和储能充电。考虑到储能可在 DG 发电不足时供应部分负荷, 其对供电可靠性的提升作用较大, 可优先将盈余功率可分配给储能充电。然而若将全部盈余功率均分配给储能, 可能导致微电网孤岛结束时储能仍剩余较多电量, 而 EV 需充电量较大, EV 将在微电网并网运行时集中充电, 存在配电变压器或线路过载的风险。因此, 本节根据储能电量状态来分配盈余发电功率, 以微电网孤岛运行结束时储能容量正好达到下限值作为调控目标, 具体调控策略如下:

假定储能装置在孤岛运行结束时电量正好耗尽, 则储能装置在孤岛运行过程中的平均输出功率 $\overline{P_{\max}^{\text{ESS}}}$ 为

$$\overline{P_{\max}^{\text{ESS}}} = \min\left[\frac{Q(t_0) - Q_{\min}}{T_K}, P_{\max}^{\text{ESS}}\right] \quad (12)$$

式中: $Q(t_0)$ 为微电网孤岛开始时刻 t_0 的储能电量; Q_{\min} 为储能最小容量限值。

如图 1 所示, 红实线 l 表示储能在调控时段内以 $\overline{P_{\max}^{\text{ESS}}}$ 功率持续放电至微电网孤岛运行结束时, 蓝实线表示储能实际可能出现的容量状态。

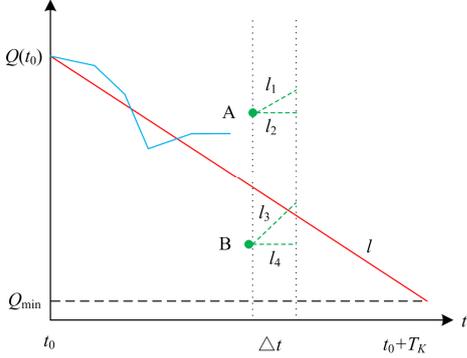


图 1 储能容量变化曲线

Fig. 1 Energy storage capacity curve

1) 若储能在 $t_0 - t$ 时间内平均输出功率小于 $\overline{P_{\max}^{\text{ESS}}}$, 则 t 时刻储能电量状态点位于 l 上方, 如图 1 中 A 点, 表明储能实际电量大于预期剩余电量, 此时 DG 的盈余功率优先分配给 EV 充电, 进而可降低后续时段的 EV 基本充电需求。储能电量状态判断条件为

$$Q(t) > Q(t_0) - (t - t_0) \overline{P_{\max}^{\text{ESS}}} \quad (13)$$

EV 充电功率 $P^{\text{EV}}(t)$ 为

$$P^{\text{EV}}(t) = \min[D(t), P_{\max}^{\text{EV}}(t)] \quad (14)$$

式中, $P_{\max}^{\text{EV}}(t)$ 为 t 时刻 EV 的最大充电功率。

由于不同 EV 的充电计划不同, 对后续时段 EV 负荷的影响也不同, 仅根据 EV 总充电功率 $P^{\text{EV}}(t)$ 无法得到 EV 的具体充电安排。因此, 本文对所建的 EV 最小高峰负荷模型进行改进, 以求取 $(t \sim t + \Delta t)$ 时段内的 EV 充电安排。在上节所建的 EV 最小高峰负荷模型的基础上增加约束条件:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} P_j^{\text{EV}} \leq P^{\text{EV}}(t) \quad (15)$$

求解 $[t, t_0 + T_K]$ 时段的 EV 最小高峰负荷模型, 得到能使剩余时段 EV 负荷峰值最小的 $(t \sim t + \Delta t)$ 时段 EV 充电安排。

此时储能实际充电功率介于虚线 l_1 和 l_2 的斜率之间, 其计算公式为

$$P^{\text{ESS}}(t) = \max[D(t) - \sum_{j=1}^N a_{ij} P_j^{\text{EV}}, 0] \quad (16)$$

即若 DG 功率分配给常规负荷和 EV 后仍有盈余, 则盈余功率分配给储能, 否则储能功率为 0。

2) 若储能在 $t_0 - t$ 时间内平均输出功率大于

$\overline{P_{\max}^{\text{ESS}}}$, 则 t 时刻储能电量状态点位于 l 下方, 如图 1 中 B 点, 表明储能实际电量小于预期剩余电量, 此时盈余功率优先分配给储能充电。储能充电功率介于虚线 l_3 和 l_4 的斜率之间, 计算公式为

$$P^{\text{ESS}}(t) = \min[D(t) - P_{\min}^{\text{P}}(t), P_{\max}^{\text{ESS}}] \quad (17)$$

同样, 在 EV 最小高峰负荷模型的基础上增加约束条件:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} P_j^{\text{EV}} \leq D(t) - P^{\text{ESS}}(t) \quad (18)$$

求解 $[t, t_0 + T_K]$ 时段的 EV 最小高峰负荷模型, 得到能使剩余时段 EV 负荷峰值最小的 $(t \sim t + \Delta t)$ 时段 EV 充电安排。

3 计及调控策略的微电网可靠性评估

在 EV 随机充电的模式下, 大规模 EV 接入会造成配电网可靠性的降低。对 EV、DG 和储能等进行合理调控可降低 EV 接入带来的不利影响。

因此, 本节基于蒙特卡洛模拟法, 研究计及所提调控策略的微电网可靠性评估方法, 其评估步骤如下:

1) 初始化微电网数据, 设定仿真次数。

2) 根据元件故障率对微电网所有元件的无故障工作时间进行随机抽样。

3) 对所有无故障工作时间小于 8760 h 的元件依次进行故障后果分析。根据故障元件的电气位置, 将负荷分为四类: A 类为不受该元件故障影响的负荷, B 类为隔离故障后可恢复供电的负荷; C 类为通过转供可恢复供电的负荷; D 类为不可转供负荷。

4) 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、负荷转供时间及故障元件的修复时间, 分别累计各负荷的停电时间、停电次数和损失负荷量。

5) 根据微电网孤岛运行率对微电网并网运行时间(外部电网元件无故障工作时间)和孤岛运行时间(外部电网元件故障修复时间)进行随机抽样。若微电网孤岛运行失败, 则累计各负荷的停电时间、停电次数和损失负荷量; 若微电网孤岛运行成功, 则按照本文所提的微电网调控策略进行控制, 其流程图如图 2 所示。微电网孤岛运行过程中, 若切除负荷, 则累计被切除负荷的停电时间、停电次数和损失负荷量。

6) 判断当前仿真时间是否达到设定的仿真次数, 若否, 返回步骤 2), 若是, 执行下一步。

7) 累加各负荷点的停电次数、停电时间和损失

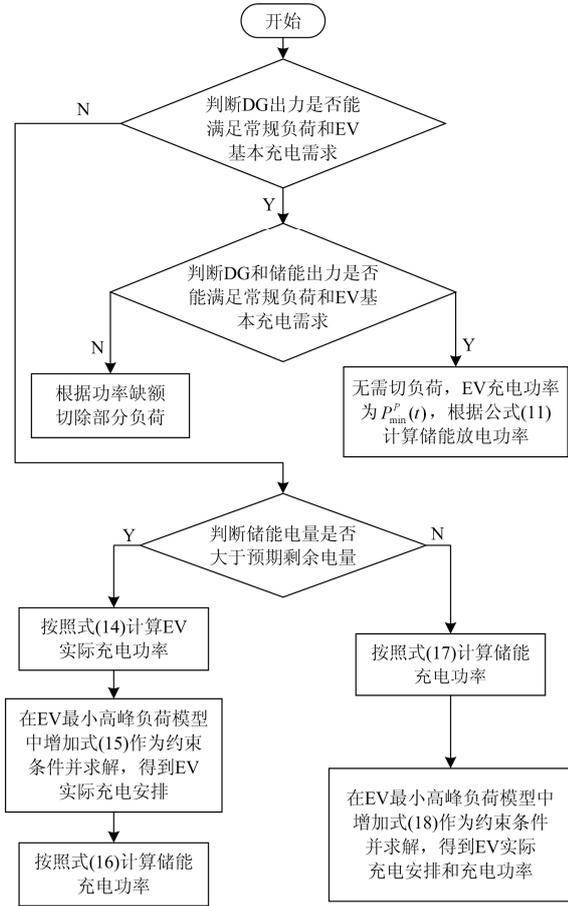


图2 计及供电可靠性的微电网调控流程

Fig. 2 Microgrid regulation process considering power supply reliability

负荷量, 计算负荷点的可靠性指标, 最后计算微电网的可靠性指标, 包括年均停电次数(System Average Interruption Frequency Index, SAIFI)、年均停电时间(System Average Interruption Duration Index, SAIDI)、供电可靠率(Average Service Availability Index, ASAI)、年均缺负荷量(Expected Energy not Supplied, EENS)^[19], 可靠性指标的计算公式分别如式(19)一式(22)所示。

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{N_T} \quad (19)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{N_T} \quad (20)$$

$$ASAI = (1 - \frac{SAIDI}{8760}) \times 100\% \quad (21)$$

$$EENS = \sum U_i L_i \quad (22)$$

式中: λ_i 为负荷点 i 的故障率; N_i 为负荷点 i 的用户数量; N_T 为用户总数量; U_i 为负荷点 i 的年均停电时间; L_i 为负荷点 i 的负荷平均功率。

4 算例分析

4.1 算例说明

采用改进的RBTS-BUS6系统的F4主馈线的部分负荷与DG、储能共同组成微电网, 如图3所示。

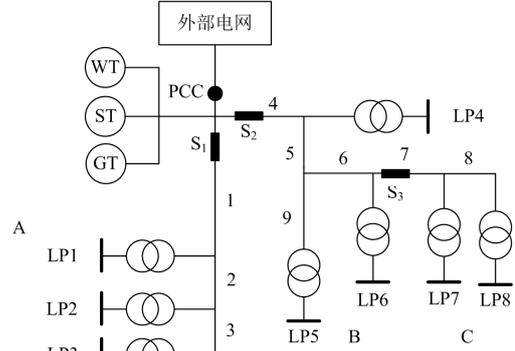


图3 改进的RBTS Bus6 F4 馈线系统

Fig. 3 Modified RBTS Bus6 F4 feeder system

在馈线1处接入微型燃气轮机GT, 其最大功率为0.3 MW; 储能系统ST, 容量为1.6 MW·h, 最大功率为0.8 MW; 风电机组WT, 其最大功率为1 MW, 切入、额定及切除风速分别为9, 38, 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。

S_1 , S_2 及 S_3 为智能速断开关, 假设其能够有效开断负荷电流, 以智能开关为分界点将微电网分为A, B, C三个负荷区块。线路长度以及线路与变压器等元件的可靠性参数详见文献[20], 其中变压器故障修复时间设为20 h。负荷参数详见文献[21-22]。假定断路器、熔断器及智能速断开关均100%可靠工作, 微电网切换为孤岛模式的失败概率为0.02。

选取LP3作为电动汽车接入的负荷点, 根据当前EV的现状和发展前景, 对算例中EV的参数设置如下:

- 1) LP3 共接入300辆电动汽车;
- 2) EV 电池容量为50 kW·h;
- 3) EV 采用恒功率充电模型, 功率为5 kW;
- 4) 假定EV接入电网的时刻服从均值为19:00、标准差为1.5 h的正态分布, 离开电网时刻服从均值为7:45、标准差为1 h的正态分布^[23];
- 5) EV 接入电网时电池SOC状态服从[0.2, 0.8]的均匀分布, EV离开时期望的电池SOC为1。

4.2 仿真结果分析

为对本文所提的EV最小高峰负荷模型、微电网调控策略进行验证, 本文设置了以下2种调控策略进行微电网可靠性评估和对比分析。

策略 1: 不对 EV 进行调控;

策略 2: 本文所提基于 EV 最小高峰负荷模型的微电网调控策略。

采用蒙特卡洛模拟法在 Matlab 软件中编程, 对元件的运行状态、电动汽车充电信息进行随机抽样, 同时在策略 2 的仿真中调用 GAMS 软件求解 EV 最小高峰负荷模型, 并将模型结果返回至 Matlab 中以对 EV 和储能进行调控, 最后进行可靠性评估, 并通过多次模拟求平均值的方式来降低随机抽样所造成的误差。不同策略下微电网可靠性的评估结果如表 1 所示。

表 1 不同策略下微电网可靠性的评估指标值

Table 1 Evaluation index value of microgrid reliability under different strategies

微电网可靠性指标	策略 1	策略 2
SAIFI/(次·a ⁻¹)	1.56	1.41
SAIDI/(h·a ⁻¹)	8.93	7.96
ASAI/%	99.898	99.909
EENS/(MW·h)	40.51	36.27

由表 1 可以看出: 相比于策略 1, 策略 2 下微电网各项供电可靠性指标均得到有效改善, 微电网负荷年均停电次数下降了 9.62%, 年均停电时间减少了 10.86%, 年均缺负荷量下降了 10.47%。

仿真结果表明, 采用本文所提的基于 EV 最小高峰负荷模型的微电网调控策略, 可以在满足 EV 充电需求的基础上, 对 EV 充电负荷进行合理调控, 减少微电网切负荷的次数和负荷量, 减少用户停电时间和次数, 降低大规模 EV 接入对电网可靠性的影响, 提升微电网可靠性水平。同时, 相比于增大微电网 DG 或储能配置容量而言, 通过合理调控 EV 充电负荷的方式来提升供电可靠性水平的经济成本低, 是提升微电网可靠性和经济性的一项可行措施。

4.3 不同因素对微网可靠性的影响分析

接入电网的 EV 数量、EV 充电功率均会影响本文所提 EV-储能调控策略对微网可靠性的提升效果, 本节通过算例仿真分析不同因素对微网可靠性的影响。

首先, 为了验证不同 EV 数量下本文所提调控策略对微电网可靠性的提升效果, 本节分别对 0 至 600 辆 EV 接入的情况下微电网可靠性水平进行评估, 其 SAIFI 指标如图 4 所示。

由图 4 可以看出: 不对 EV 进行调控(策略 1)时, 随着 EV 数量的增加, 微电网的 SAIFI 指标逐渐增大, 可靠性降低的速度先增大后减小。这是由于 EV 数量较少时, 充电负荷较小, 可由微电网内

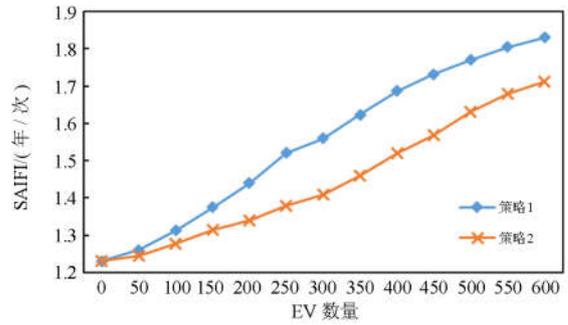


图 4 不同 EV 数量时的微电网 SAIFI 指标

Fig. 4 SAIFI indicator of microgrid with different EV quantities

部电源供电, 切负荷的情况较少。随着 EV 数量增多, 微网可靠性水平随 EV 数量增多而加速下降。当 EV 达到一定数量时, 孤岛运行时微电网内部电源难以满足负荷需求, 需切除负荷, EV 数量的增多对微电网可靠性指标的影响较小, 此时可靠性指标接近不含 DG 和储能时的可靠性水平。

根据策略 2 进行调控时, 微电网 SAIFI 指标优于策略 1, 随着 EV 数量的增多, 策略 2 相比于策略 1 的可靠性提升程度先增大后减小。这是由于当 EV 数量较少时, 可调控的 EV 负荷较小, 对微电网可靠性的影响较小; 当 EV 逐渐增多达到一定数量后, 调控后的 EV 负荷仍较大, 微电网电源难以满足负荷需求, 此时策略 2 的可靠性指标接近策略 1。

为了验证不同 EV 充电功率下本文所提调控策略对微电网可靠性的影响, 本节分别对充电功率为 3~10 kW 时微电网可靠性水平进行评估, 其 SAIFI 指标如图 5 所示。

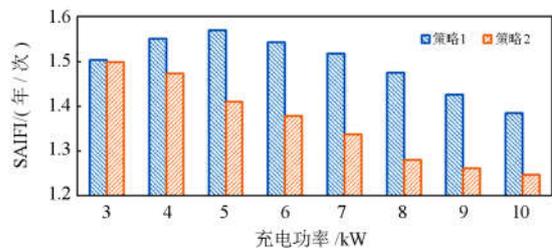


图 5 不同 EV 充电功率时的微电网 SAIFI 指标

Fig. 5 SAIFI indicator of microgrid with different EV charging power

从图 5 可以看出: (1) 当 EV 充电功率较小时, 策略 2 对微网可靠性的提升效果不明显。这是因为 EV 充电功率小导致其需充电时间长, 甚至接近于其接入电网时间, EV 可调控裕度小, 策略 2 效果不明显。(2) 随着 EV 充电功率增大, 策略 2 对微网可靠性的提升程度逐渐增大, 当 EV 充电功率较大时, 策略 2 下的微电网可靠性逐渐接近未接入 EV

时的可靠性水平。这是由于本文算例中微网孤岛运行时间平均为 5 h(即外部线路故障修复时间), EV 接入电网时长平均为 12.75 h, EV 充电功率大时, 其需充电时间小, 可选择在非孤岛运行时段内充电, 对微电网孤岛运行的影响较小。

综上所述, 本文所提的微电网联合调控策略可有效降低 EV 接入对微电网可靠性的影响, 且当 EV 数量和充电功率在一定范围内时, 调控策略对可靠性的提升效果最好。当 EV 渗透率较高, 需通过增大微电网 DG 或储能配置容量等途径来提升供电可靠性水平。

5 结论

鉴于电动汽车充电时间灵活、调控性能好, 可作为一种可控负荷参与微电网孤岛运行时的负荷调节, 避免因 DG 发电量小于负荷量而切负荷。本文建立了 EV 最小高峰负荷模型, 以对微电网孤岛运行时段内 EV 的调控潜力进行评估; 提出了计及供电可靠性的微电网 EV-储能联合调控策略, 根据孤岛时微电网实时负荷量、发电量、储能状态以及 EV 调控潜力, 对 EV 和储能进行联合调控; 然后, 采用蒙特卡洛模拟法, 提出了计及 EV-储能联合调控的微电网可靠性评估方法; 最后, 通过改进的 RBTS Bus6 F4 馈线系统进行算例仿真。仿真结果验证了所提模型和策略的有效性。在满足 EV 充电需求的基础上, 对 EV 充电负荷和储能进行联合调控可有效降低 EV 接入对可靠性的影响, 提升微电网的可靠性水平。当 EV 数量和充电功率在一定范围内时, 调控策略对可靠性的提升效果最好。当 EV 渗透率较高时, 需通过增大微电网 DG 或储能配置容量等途径来提升供电可靠性水平。总体而言, 所提的联合调控策略是提升含 EV 接入的微电网可靠性和经济性的一项可行措施。

同时, 本文的研究仅将电动汽车作为一种可控负荷, 未考虑其作为移动式储能时对微电网可靠性的影响。在下一步的研究中需对此加以考虑, 以进一步提升微电网的可靠性水平。

参考文献

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASAND H, IRAVANI, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.
LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [3] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [4] IKAHEIMO J, EVENS C, KARKKAINEN S. DER aggregator business: the Finnish case[R]. Helsinki, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland 2010.
- [5] 周保荣, 黄廷城, 张勇军. 计及激励型需求响应的微电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 70-78.
ZHOU Baorong, HUANG Tingcheng, ZHANG Yongjun. Reliability evaluation of microgrid considering incentive demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 70-78.
- [6] CAI Hui, CHEN Qiyu, GUAN Zhijian, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [7] 李博嵩, 王旭, 蒋传文, 等. 广泛负荷聚集市场策略建模及风险效益分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 119-126.
LI Bosong, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Market strategy modeling and risk profit analysis of demand-side resource aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 119-126.
- [8] 王闪闪, 赵晋斌, 毛玲, 等. 基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 31-38.
WANG Shanshan, ZHAO Jinbin, MAO Ling, et al. A control strategy based on mobile energy storage characteristic of electric vehicles in DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 31-38.
- [9] HU K W, LIAW C M. Incorporated operation control of DC microgrid and electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 202-215.
- [10] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions

- of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [11] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [12] 王湘, 杨健维, 何正友. 一种 V2G 模式下计及开断概率和负荷转移概率的配电网可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2213-2219.
WANG Xiang, YANG Jianwei, HE Zhengyou. A reliability evaluation algorithm for distribution network under V2G mode considering probabilities of breaking and load transfer[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2213-2219.
- [13] 殷自力, 郑佩祥, 陈宇星, 等. 含电动汽车和分布式电源的配电网的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 77-83.
YIN Zili, ZHENG Peixiang, CHEN Yuxing, et al. Reliability evaluation for distribution network with electric vehicle and distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 77-83.
- [14] 白浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 联合发电系统用于含电动汽车的配电网可靠性评估研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 127-137.
BAI Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. Reliability assessment based on combined power generation system for distribution system with electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 127-137.
- [15] 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.
- [16] 黄廷城. 计及电动汽车充放电策略与需求响应的微电网可靠性分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
HUANG Tingcheng. Reliability evaluation of microgrid considering electric vehicle charging/discharging strategy and demand response[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [17] 王绍阳, 李勇, 刘乾易, 等. 应用感应滤波原理构建的电动汽车充电站直流供电系统[J]. 新能源汽车供能技术, 2018, 2(4): 1-6.
WANG Shaoyang, LI Yong, LIU Qianyi, et al. DC power supply system of electric vehicle charging station developed with inductive filtering method[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2018, 2(4): 1-6.
- [18] 任德江, 吴杰康, 毛骁. 考虑功率分布特性的微网风电功率预测模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 56-62.
REN Dejiang, WU Jiekang, MAO Xiao. Prediction model of micro-grid wind power considering power distribution characteristics[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 56-62.
- [19] 张孝军. 住宅用户需求响应对配电网供电可靠性的影响分析[J]. 陕西电力, 2017, 45(5): 36-41, 47.
ZHANG Xiaojun. Influence of residential demand response coordination upon the distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(5): 36-41, 47.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ALKUHALI A A, RAGHAVAN S, CHOWDHURY B H. Reliability evaluation of distribution systems containing renewable distributed generations[C] // North American Power Symposium (NAPS), 2012: 1-6.
- [23] 刘利兵, 刘天琪, 张涛, 等. 计及电池损耗特性的电动汽车有序充放电策略优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 83-90.
LIU Libing, LIU Tianqi, ZHANG Tao, et al. Orderly charging and discharging strategy optimization for electric vehicles considering dynamic battery-wear model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 83-90.

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2019-01-31

作者简介:

陈旭(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划研究与管理; E-mail: chenxu@csg.cn

叶琳浩(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统优化运行与可靠性分析; E-mail: yelhc@csg.cn

黄廷城(1992—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统可靠性与规划、新能源与智能用电。E-mail: 339536312@qq.com

(编辑 葛艳娜)