

考虑电动汽车随机接入的微网优化调度

苗轶群¹,江全元¹,曹一家²

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 在电动汽车(EV)行驶统计规律的基础上,提出 EV 智能接入模式下的微网优化调度模型,微网调度机构根据不同 EV 用户需求、可再生能源功率、其他负荷功率以及 EV 充放电过程需满足的约束,给出包括 EV 在内的微网内所有设备的运行策略。该模型可利用 CPLEX 软件求解。以 14 节点微网系统为例,分别对 EV 随机充电模式、错峰充电模式以及智能接入模式下的微网调度运行进行优化,结果表明,智能接入模式下的 EV 作为分散式储能单元,与微网内集中式储能元件协调配合,发挥移峰填谷的作用,更具经济性。

关键词: 电动汽车;建模;微网;优化调度;混合整数线性规划

中图分类号: TM 734;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.001

0 引言

电动汽车 EV(Electric Vehicle)可以有效缓解能源紧缺、环境污染等问题,国家近年来出台了一系列政策支持 EV 产业的发展^[1]。国家电网公司已建成多个 EV 能源供给设施示范工程^[2]。EV 可通过交流充电桩分散式接入电网进行充电,也可以驶入大型充换电站进行集中快速充电或更换电池。EV 如果具有 V2G(Vehicle to Grid)功能^[3],还可以在闲置时向电网输送能量,从而可作为移动分散式储能单元与电网实现互动。

对于 EV 个体,在分散式接入方式下,受充电装置容量的限制,一般采用慢速充电方式,充电功率小,对电池寿命影响较小^[1],但充电时间较长。对于大量 EV 无序充电,其整体行为将导致电网安全性降低、网损增加、网络阻塞加剧等负面结果,有必要在智能电网和可再生能源利用环境下对其调度和控制进行优化管理^[4]。

微网是将可再生能源、微型燃气轮机(MT)、燃料电池(FC)等分布式电源发电装置,以及负荷、储能装置等有机结合并接入到电网的技术^[5-6]。作为分散式储能单元的 EV 接入微网,可用于接纳可再生能源可能出现的能量过剩,也可作为备用提高微网的可靠性。

文献[7]提出了包含风、光、储、EV 等的微网经济调度模型,分析了 EV 对微网经济性的影响;节约

储能设备投资,减少微网和 EV 用户的运行费用。但文中对 EV 行为的假设过于单一,忽视了大量 EV 行驶过程、充电过程中体现出的随机特性,与实际差异较大。文献[8]考虑了 EV 开始充电时刻和日行驶里程的统计规律,建立了 EV 功率需求的统计模型,可用于研究 EV 充电对电网的影响。对于研究具有 V2G 功能的 EV 的充放电行为,需要考虑更多的随机因素,如 EV 充放电功率曲线与 EV 充放电时刻、荷电状态 SOC(State Of Charge)有关,而充放电时刻、SOC 又与 EV 驾驶行为直接相关。文献[9]建立了含大规模可入网混合动力 EV 的电网安全约束机组组合优化模型,将充放电过程按照时段分别考虑,忽略了 SOC 对混合动力 EV 的 V2G 功能的影响。在将 EV 的整体功率具体分配到每辆 EV 时,或在微网中每辆 EV 的功率和容量与储能设备的功率和容量相比不能忽略时,有必要考虑 EV 荷电量对其充放电功率的影响。

本文以微网系统为基础,提出了一种 EV 智能接入模式,对 EV 充放电进行控制,建立了 EV 智能接入模式下的微网优化调度模型。最后,基于 EV 行驶统计规律,对 EV 的行为进行模拟,比较了智能充放电控制模式与随机充电模式、错峰充电模式下的微网优化调度效果。

1 EV 接入模式

随机充电模式中,EV 在最后一次行程结束回到家后,开始充电直至电池组充满。充电行为体现出较强的随机性。

随着 EV 数量增多,充电功率可能对系统负荷产生较大影响,甚至出现新的负荷峰值^[10]。可以通过延迟 EV 的充电时间,在负荷低谷时,如假设在 24:00 后开始充电^[11],可以起到很好的移峰填谷的作用,即错峰充电模式。

收稿日期:2013-03-22;修回日期:2013-10-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012CB215106);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA05Z221);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0489)

Project supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB215106),the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2009AA05Z221) and the Program for New Century Excellent Talents in University(NCET-08-0489)

V2G 概念的提出,使闲置的 EV 在电池组容量允许的条件下,在负荷高峰时将电池组中的能量返回电网,将进一步提高移峰填谷的能力^[3]。

智能接入模式中, EV 用户与微网签订协议, EV 接入充放电装置后,其充放电过程可由微网调度,车主可以通过人机接口对充放电过程提出要求,比如保留足够的电量满足临时出行,下一次出行时间、行驶里程等。为便于微网制定日前计划, EV 用户还要根据自身需要对下一日行驶计划进行估计,给出 EV 闲置并可被调度的时间范围。

2 EV 随机、错峰充电模式下的微网优化调度

EV 接入微网后,成为微网的设备。微网在满足 EV 能量需求的同时,协调内部设备,使微网运行更加经济。EV 充电功率是微网总负荷的一部分,即微网的参数是优化调度的重要数据。然而充电功率与 EV 行驶里程、充电时间等不确定因素有关,因此需要通过生成服从统计规律的随机事件对逐辆 EV 进行仿真。将所有 EV 功率曲线叠加就可得到总的充电功率曲线,更新微网优化调度问题中的相关参数,通过优化得到结果,其流程图如图 1 所示。

对每辆 EV,大约有 14% 的概率不会出行^[12],如果出行,其日行驶里程 d 近似服从对数正态分布^[13],其概率密度函数为:

$$g(d) = \frac{1}{d\sigma_d\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln d - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (1)$$

其中, μ_d, σ_d 为分布参数,可根据 EV 行驶里程的统计均值 m_n 、标准差 s_d 求得:

$$\begin{cases} \mu_d = \ln m_n - 0.5 \ln(1 + s_d^2/m_n^2) \\ \sigma_d = \sqrt{\ln(1 + s_d^2/m_n^2)} \end{cases} \quad (2)$$

相应的第 i 辆 EV 充电电量需求 e_i 为:

$$e_i = \eta_{EV} d_i \quad (3)$$

其中, η_{EV} 为 EV 每 km 耗电量, d_i 为第 i 辆 EV 的日行驶里程。

在随机充电模式下,第 i 辆 EV 充电开始时刻 $t_{i,A}$ 为接入电网时刻,可认为是每天最后行驶结束时刻,近似服从正态分布^[8]:

$$f_A(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_A\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right] & \mu_A - 12 < t \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_A\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t+24-\mu_A)^2}{2\sigma_A^2}\right] & 0 < t \leq \mu_A - 12 \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\mu_A = 17.6, \sigma_A = 3.4$ 。

在错峰充电模式下, EV 充电被延后至负荷水平较低的时段,如 $t_{i,A}$ 可取为 00:00—01:00 范围内服从均匀分布的随机数。

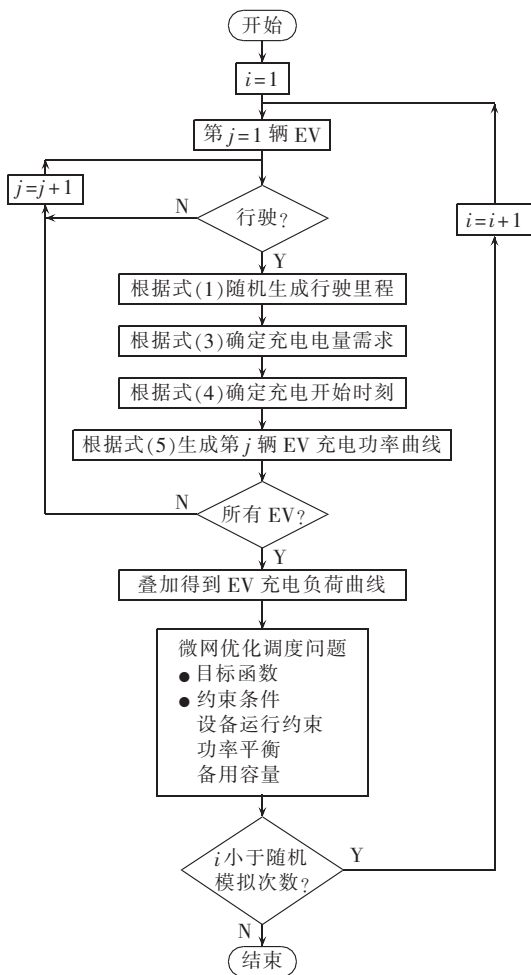


图 1 EV 随机、错峰充电模式下微网优化调度分析

Fig.1 Analysis of optimal microgrid dispatch in random and off-peak EV charging modes

EV 连续充电直至满足充电电量需求 e_i 。由于过充、过放都会对电池组寿命产生不良影响,所以电池组 SOC 在使用过程中一般被限定在某一范围内,如 30%~90% 之间。而在这一区间进行充电时,充电功率可近似为常数^[8],设为 p_+ ,则 EV 充电功率曲线可表示为:

$$P_{EV,i+}^t = \begin{cases} p_+ & t_{i,A} \leq t \leq t_{i,\#} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{i,\#} = t_{i,A} + e_i/p_+ \quad (6)$$

其中, $t_{i,\#}$ 为充电结束时刻。

将所有 EV 的功率曲线叠加即可得到每一时刻所有 EV 总的充电负荷。

以上 EV 接入模式下,微网优化调度模型的目标是使微网运行成本最小、收益最大。微网运行成本包括微网从配电网购电成本、微网内部各元件运行成本;微网运行收益包括向配电网售电收益。约束条件包括微网内元件的运行条件约束,如微型电源的功率、爬坡率,储能电站 ESS(Energy Storage Station)的功率、功率变化率、SOC 等约束。

微网内功率平衡约束可表示为:

$$P_{g+}^t + \sum_{i \in S_G} P_{G,i}^t + \sum_{i \in S_L} P_{L,i}^t + P_{ESS,-}^t = P_{g-}^t + \sum_{i \in S_L} P_{L,i}^t + P_{ESS,+}^t + \sum_{i \in S_{EV}} P_{EV,i+}^t \quad (7)$$

其中, P_{g+}^t 和 P_{g-}^t 为微网通过公共连接点 PCC (Point of Common Coupling) 从电网吸收和发出的功率; S_G 为微型可控电源集合, $P_{G,i}^t$ 为微型可控电源出力; S_L 为可再生能源集合, $P_{L,i}^t$ 为相应出力; $P_{ESS,+}^t$ 、 $P_{ESS,-}^t$ 为 ESS 充、放电功率; S_L 为负荷集合, $P_{L,i}^t$ 为负荷功率; S_{EV} 为 EV 集合, $P_{EV,i+}^t$ 为 EV 充电功率。

微网系统的备用约束为:

$$\bar{P}_{g+}^t - P_{g+}^t + P_{g-}^t + \sum_{i \in S_G} (U_{G,i}^t \bar{P}_{G,i}^t - P_{G,i}^t) \geq R\% \cdot \left(\sum_{i \in S_L} P_{L,i}^t + \sum_{i \in S_{EV}} P_{EV,i+}^t \right) \quad (8)$$

其中, $\bar{P}_{g+}^t$ 为 PCC 处交换功率极限; $U_{G,i}^t$ 为开停机状态变量, 开机为 1, 停机为 0; $\bar{P}_{G,i}^t$ 为微型可控电源出力的上限; $R\%$ 为系统备用率。

3 EV 智能接入模式下微网优化调度

有统计表明在某一时刻至少 88% 的 EV 是处于闲置状态的^[14]。此时, 可将 EV 通过智能装置连接于微网, 由微网控制其充电或放电。

当 EV 充电、V2G 功能可控时, 微网可充分利用 EV 分散式储能的潜力, 提高经济性。这种模式下 EV 的充放电状态为自变量, 相应的功率为因变量。EV 何时充电、何时放电由微网调度根据 EV 行驶状态、与配电网交换电价、可再生能源功率等因素, 基于全部时段进行综合考虑, 与其他可控变量, 如微型可控电源、ESS 等进行协调配合。

EV 在充电或 V2G 状态时, 电池组 SOC 均被限定于 30%~90%, 相应充电功率、V2G 功率都可近似为常数。V2G 功率设为 p_- 。

充放电功率还要受电池组 SOC 限制, 当 SOC 接近 90% 时, 将停止充电; SOC 接近 EV 用户设定值时, 将停止放电。即 SOC 为重要的因变量, 其状态与 EV 的行驶里程相关, 也就需要对 EV 进行更详细的模拟。EV 智能接入模式下的微网优化调度流程如图 2 所示。

EV 行驶里程生成如前文所述。假设第 i 辆 EV 全天行驶里程平均等效至首次和末次行程, EV 首次行程开始前电量满, 则首次行程结束后的有效荷电量, 即初始时刻 $t_{i,L}$ 荷电量为:

$$E_{EV,i}^t | (t=t_{i,L}) = e_0 - \eta_{EV} d_i / 2 \quad (9)$$

其中, $E_{EV,i}^t$ 为第 i 辆 EV 在 t 时刻的有效荷电量, e_0 为有效总电量。假设电池组容量为 50 kW·h, SOC 在 30%~90% 之间变化时, 电池组电量在 15~45 kW·h 之间变化, 对该范围重新划分, 得到有效荷电量 $E_{EV,i}^t$ 变化范围为 0~ e_0 , $e_0=30$ kW·h。

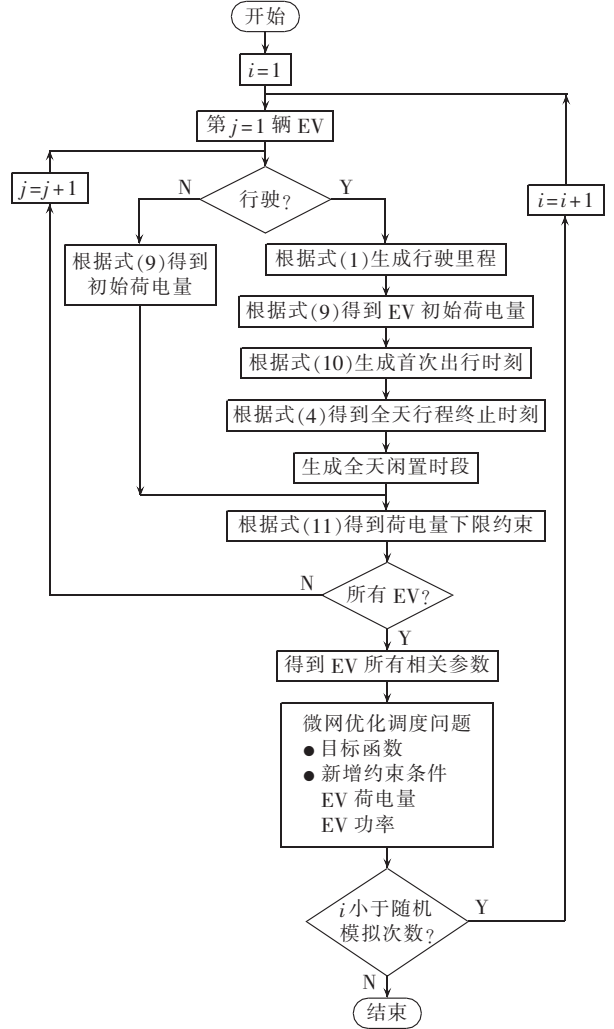


图 2 智能接入模式下微网优化调度分析

Fig.2 Analysis of optimal microgrid dispatch in smart EV integration mode

首次出行开始时刻 $t_{i,L}$ 近似服从正态分布:

$$f_L(t) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2} \right] \quad (10)$$

其中, $\mu_L=7.2$, $\sigma_L=2.1$ 。

全天行程终止时刻 $t_{i,A}$ 与前文一致。

将 $t_{i,L} \sim t_{i,A}$ 时段内每 30 min 划分为一个子时段, 根据 EV 行驶统计规律, 确定每个子时段 EV 处于行驶状态还是闲置状态。图 3 所示为 EV 在每个时段处于闲置状态的概率^[14]。由统计可知, 由于每次出行时间平均为 17.5 min^[15], 所以 EV 在每个子时段是否处于行驶状态彼此独立。在 $t_{i,L} \sim t_{i,A}$ 时段外, EV 处于

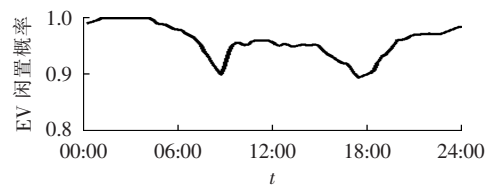


图 3 EV 在每个时段的闲置概率

Fig.3 Out-of-use probability of EV

闲置状态。由此得到 EV 全天闲置时段,此时 EV 可由微网调度。

EV 用户会根据预留里程 d_r 设定 $E_{EV,i}^l$ 的下限,以保证有足够的电量满足出行。在 $t_{i,L} \sim t_{i,A}$ 时段内, d_r 包括回程里程和备用里程 d_B 。回程里程为 $d_i/2$,备用里程是为了满足临时购物、紧急就医等计划外的行驶需要而保留的,可取为 32 km^[16]。在 $t_{i,L} \sim t_{i,A}$ 时段外, d_r 仅可取为 d_B 。 $E_{EV,i}^l$ 的下限可表示为:

$$E_{EV,i}^l = \begin{cases} (d_B + d_i/2)\eta_{EV} & t_{i,L} \leq t \leq t_{i,A} \\ d_B\eta_{EV} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

如果全天 EV 未行驶过,则 $t_{i,L}, t_{i,A}$ 都取为 μ_L, d_i 取为 0,初始 $E_{EV,i}^{t_{i,L}}$ 取为 e_0 。

EV 智能接入模式下,微网优化调度模型的目标函数与以上 2 种模式一致。加入 EV 相关的新约束。

EV 荷电量约束:

$$E_{EV,i}^l \leq E_{EV,i}^t \leq e_0 \quad (12)$$

EV 功率定义:

$$\begin{cases} P_{EV,i,t}^+ = U_{EV,i,t}^+ p_+ \\ P_{EV,i,t}^- = U_{EV,i,t}^- p_- \end{cases} \quad (13)$$

其中, $U_{EV,i,t}^+, U_{EV,i,t}^-$ 分别为电动汽车充、放电状态标志位,当 $U_{EV,i,t}^+$ 为 1 时,表示电动汽车处于充电状态,为 0 时表示不处于充电状态。

EV 荷电量与功率满足:

$$E_{EV,i}^t - E_{EV,i}^{t-1} + (P_{EV,i,t}^+ - P_{EV,i,t}^-) \Delta t = 0 \quad (14)$$

充放电状态互斥约束:

$$U_{EV,i,t}^+ + U_{EV,i,t}^- \leq 1 \quad (15)$$

在 EV 行驶时段,不进行充放电,设置标记位 $u_{i,Av}^t$ 参数值由用户定义,在 EV 处于闲置状态并可被调度时置 1,行驶时置 0, EV 充放电状态需满足约束:

$$U_{EV,i,t}^+ + U_{EV,i,t}^- \leq u_{i,Av}^t \quad (16)$$

在下一天 EV 出发前充满电量:

$$E_{EV,i}^{t_{i,L}-1} = e_0 \quad (17)$$

功率平衡约束:

$$\begin{aligned} P_{g^+}^t + \sum_{i \in S_{G_+}} P_{G,i}^t + \sum_{i \in S_{L_1}} P_{L,i}^t + P_{ESS,-}^t + \sum_{i \in S_{EV}} P_{EV,i,t}^+ = \\ P_{g^-}^t + \sum_{i \in S_{L_2}} P_{L,i}^t + P_{ESS,+}^t + \sum_{i \in S_{EV}} P_{EV,i,t}^- \end{aligned} \quad (18)$$

系统备用约束:

$$\bar{P}_{g^+}^t - P_{g^+}^t + P_{g^-}^t + \sum_{i \in S_{G_+}} (U_{G,i}^t \bar{P}_{G,i}^t - P_{G,i}^t) \geq R\% \cdot \sum_{i \in S_{L_1}} P_{L,i}^t \quad (19)$$

紧急情况时将 EV 状态设置为放电,即由 EV 提供附加备用为:

$$\sum_{i \in S_{EV}} (p_- - P_{EV,i,t}^- + P_{EV,i,t}^+) u_{i,Av}^t \quad (20)$$

4 算例分析

4.1 微网系统参数

微网系统结构如图 4 所示^[17],其中可控微型电源包括微型燃气轮机、3 台柴油发电机(DE)、燃料电

池,分别采用分段线性化模型描述功率成本关系,如图 5 所示;不可控可再生能源包括风力发电机(WT)、光伏电站(PV)。微网区域常规负荷、光伏电源和风电的功率典型曲线如图 6 所示。

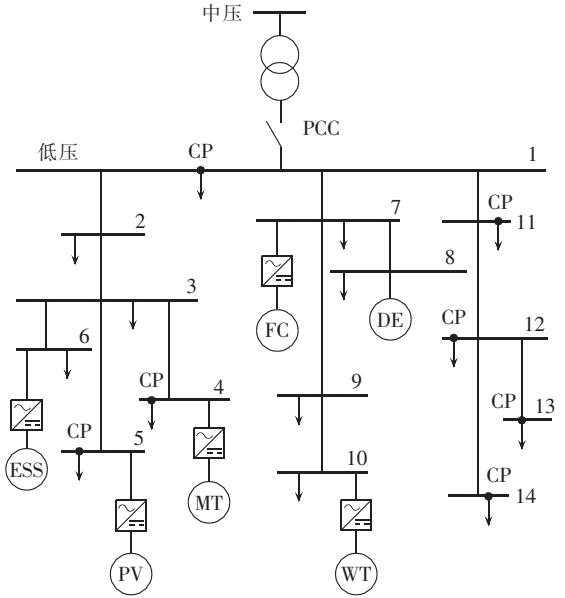


图 4 微网结构

Fig.4 Structure of microgrid

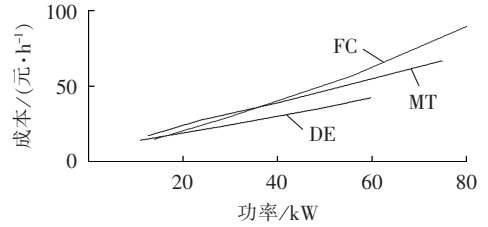


图 5 分段线性化后的成本-功率曲线

Fig.5 Cost-power curve after piecewise linearization

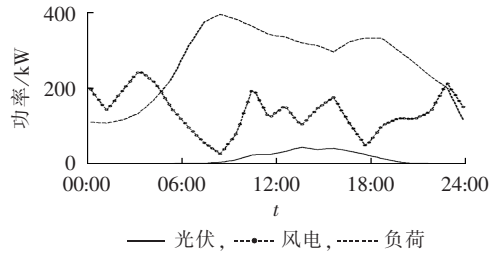


图 6 负荷、光伏和风电的功率典型曲线

Fig.6 Typical power curves of load, photovoltaic and wind power

ESS 为集中式储能元件,容量 400 kW·h,假设在 30%~90% 之间变化,最多可充电 240 kW·h,其他参数如下:最大功率 100 kW,功率变化率 300 kW/h,维护成本 0.05 元/(kW·h),状态转换损耗 80 元/次。EV 作为分散式储能单元通过充电桩(CP)接入微网,可以充电,也可以利用 V2G 功能放电,充放电功率 p_+, p_- 都取为 4 kW。EV 标准动力电池组总容量 50 kW·h,有效荷电量 30 kW·h,每百 km 耗电量 20 kW·h,

满电量可行驶里程 150 km。电价如图 7 所示。

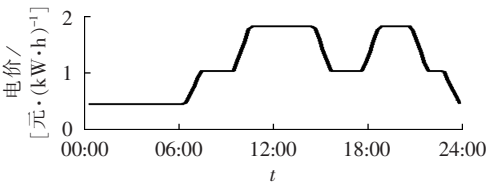


图 7 电价曲线
Fig.7 Power price curve

4.2 优化结果

随机产生 1000 个场景,每个场景 50 辆 EV,按照图 1、图 2 所示流程对随机充电模式下、错峰充电模式下及智能接入模式下所有场景进行随机模拟,利用 CPLEX 软件^①对优化模型进行求解,得到 3 种模式下微网运行成本如表 1 所示。在满足 EV 能量需求的相同条件下,智能接入模式较随机充电模式节约平均成本约 31%,较错峰充电模式节约平均成本约 26%,经济性较好。

表 1 微网运行成本
Tab.1 Operational cost of microgrid

模式	成本最高值/元	成本最低值/元	成本均值/元
随机充电	3 153.8	2 878.2	3 009.2
错峰充电	2 860.6	2 768.4	2 810.6
智能接入	2 146.5	2 004.7	2 063.9

在某一场景内 3 种接入模式下 EV 功率曲线与原有负荷及可再生能源功率的叠加效果如图 8 所示。微网与配电网间交换功率如图 9 所示。

在无 EV 接入的微网中,负荷与可再生能源功率

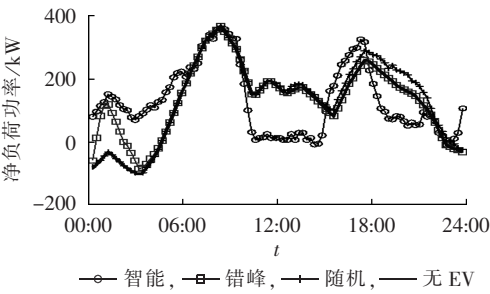


图 8 负荷与可再生能源功率之差
Fig.8 Power difference between load and renewable energy

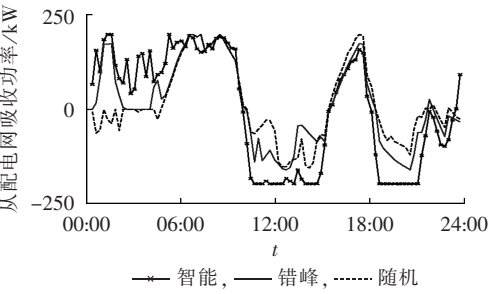


图 9 PCC 交换功率
Fig.9 Power exchange at PCC

之差表征功率的缺额,需要对微型电源、ESS 等可控单元进行优化调度以保证运行经济并最大限度地利用可再生能源。

随机充电模式下, EV 充电主要集中在 17:00 以后,此时电价较高,微网以向配电网卖电为主。充电功率影响外送功率,减少了收益。在 00:00—05:00 微网内可再生能源功率过剩,除部分储存于 ESS 内,其他只能以较低价格出售。

错峰充电模式下, EV 充电主要集中在 00:00—04:00,有效利用了可再生能源的过剩功率,略微提高了经济性。

在智能接入模式下, EV 作为分散式储能装置,与 ESS 协调配合,在电价较低,即配电网负荷低谷时,集中充电;在电价较高,即配电网负荷高峰时,集中放电,进一步提高了微网的经济性,对配电网起到“移峰填谷”的作用。ESS 循环次数减少,延长了使用寿命,如图 10 所示。

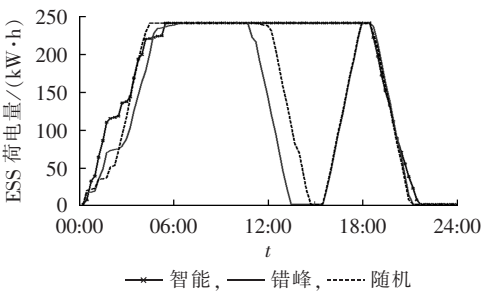


图 10 储能电站荷电量
Fig.10 Energy of ESS

所有 EV 以及某 1 辆 EV 的充放电功率、等效荷电量如图 11、图 12 所示。EV 首次出行前充满电量,即 06:00 左右荷电量接近最高值。首次出行结束后,可以利用较低电价继续充电,补充行驶所耗能量。10:00—15:00,大部分 EV 处于闲置状态,可被微网调度,在电价较高时段放电。17:00—21:00, EV 放电功率略有减小,这是因为此时段为 EV 末次出行集中时段, EV 处于行驶状态,不可被调度。EV 在全天电价较低时充电。EV 在行驶时,充放电功率为 0,全天行驶里程所耗电量被平均等效至首、末 2 次出行时段,如图 12 所示。

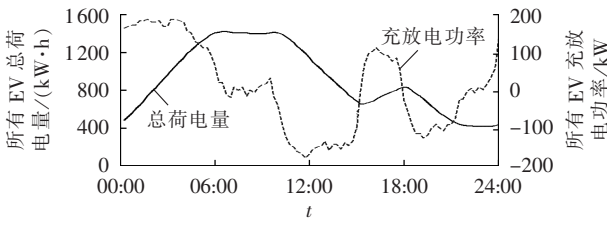


图 11 所有 EV 荷电量与功率
Fig.11 Energy and power of all EVs

① IBM Corporation. IBM ILOG CPLEX 12.1 user's manual. 2009.

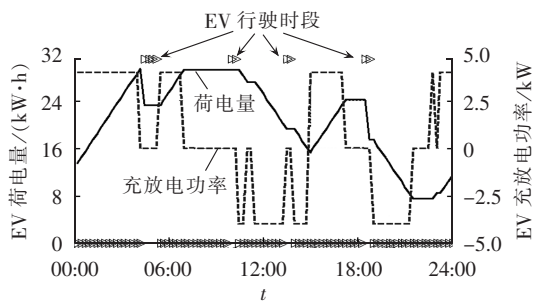


图12 某辆EV荷电量及功率

Fig.12 Energy and power of one EV

5 结论

由于EV接入电网具有很强的不确定性,在随机充电模式和错峰充电模式下很难建立严格的数学模型,利用随机模拟方法对EV充电功率曲线进行研究。提出了EV智能接入模式,并建立了相应的微网优化调度模型。以14节点微网为例,利用CPLEX软件求解混合整数线性规划问题,给出每辆EV的充放电策略。

智能接入模式既可以满足EV行驶的需求,又充分利用EV闲置的电量,发挥其分散式储能的功能,实现移峰填谷的作用,提高了微网的经济性。

参考文献:

- [1] 陈良亮,张浩,倪峰,等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):11-17.
CHEN Liangliang,ZHANG Hao,NI Feng,et al. Present situation and development trend for construction of electric vehicle energy supply infrastructure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(14):11-17.
- [2] 熊虎,向铁元,荣欣,等. 电动汽车电池更换站布局的最优规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):1-6.
XIONG Hu,XIANG Tiejuan,RONG Xin,et al. Optimal allocation of electric vehicle battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):1-6.
- [3] 曾正,赵荣祥,杨欢,等. 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):7-13.
ZENG Zheng,ZHAO Rongxiang,YANG Huan,et al. Responsive schemes to high penetration of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):7-13.
- [4] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.
WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-52.
- [5] 别朝红,李更丰,王锡凡. 含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
BIE Zhaohong,LI Gengfeng,WANG Xifan. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):1-6.
- [6] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):120-123.
WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(4):120-123.
- [7] 茆美琴,孙树娟,苏建徽. 包含电动汽车的风/光/储微电网经济性分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):30-35.
MAO Meiqin,SUN Shujuan,SU Jianhui. Economic analysis of a microgrid with wind/photovoltaic/storages and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):30-35.
- [8] 田立亭,史双龙,贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术,2010,34(11):126-130.
TIAN Liting,SHI Shuanglong,JIA Zhuo. A statistic model for charging power demand of electric vehicles [J]. Power System Technology,2010,34(11):126-130.
- [9] 蔡秋娜,文福拴,薛禹胜,等. 基于SCUC的可入网混合电动汽车优化调度方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(1):38-46.
CAI Qiuna,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. An SCUC-based optimization approach for power system dispatching with plug-in hybrid electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012,36(1):38-46.
- [10] SORTOMME E,MOHAMMAD M,MACPHERSON S,et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Trans on Smart Grid,2011, 2(1):198-205.
- [11] 徐立中,杨光亚,许昭,等. 考虑风电随机性的微网热电联合调度[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):53-60.
XU Lizhong,YANG Guangya,XU Zhao,et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9):53-60.
- [12] VYAS A,SANTINI D. Use of national surveys for estimating 'Full' PHEV potential for oil use reduction[C]//Plug-In Conference. San Jose,USA:[s.n.],2008:1-5.
- [13] QIAN K,ZHOU C,ALLAN M,et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,2011,26(2):802-810.
- [14] MA Y,HOUGHTON T,CRUDEN A,et al. Modeling the benefits of vehicle-to-grid technology to a power system[J]. IEEE Trans on Power Systems,2012,27(1):206-213.
- [15] VYAS A,SANTINI D,JOHNSON L. Plug-in hybrid electric vehicles' potential for petroleum use reduction:issues involved in developing reliable estimates[EB/OL]. [2009-03-01]. <http://www.Transportation.anl.gov/pdfs/TA/621.pdf>.
- [16] KEMPTON W,TOMIC J. Vehicle to grid fundamentals:calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources,2005, 144(1):268-279.
- [17] TSICALAKIS A,HATZIARGYRIOU N. Centralized control for optimizing microgrids operation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2008,23(1):241-248.

作者简介:

苗轶群(1982-),男,吉林吉林人,博士研究生,研究方向为电动汽车充换电、微电网优化运行与控制(E-mail:zjumiaoyiqun@gmail.com);

江全元(1975-),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为分布式发电与集中式可再生能源发电、电力系统稳定与控制、高速铁路牵引供电(E-mail:jyq@zju.edu.cn);

曹一家(1969-),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、信息技术在电力系统中的应用(E-mail:yjcao@hnu.edu.cn)。

基于多元非线性回归模型的环型中压配电网 最大供电能力评估方法

吴云亮¹, 沈阳武¹, 林 超¹, 彭晓涛¹, 孙元章¹, 许良柱²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 凯里供电局, 贵州 凯里 556000)

摘要: 基于潮流跟踪理论确定线路功率的主导开闭所负荷, 并建立线路功率与主导开闭所负荷之间的功率分摊多元非线性回归模型。在此基础上, 提出以变电站下网功率之和最大为目标函数, 以电网 $N-1$ 供电安全准则下的变电站主变容量限制、线路传输容量限制及开闭所容量限制为约束条件的环型配电网最大供电能力模型。利用序列二次规划方法求解该模型的全局最优解。8 节点环网算例和凯里 2015 年规划双环配电网算例结果验证了所提方法的可行性。

关键词: 中压配电网; 环型供电; 最大供电能力; 模型; 序列二次规划

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.002

0 引言

城市配电网作为联系终端用户与发、输电系统的重要纽带, 是城市建设和经济发展的重要基础设施, 担负着给终端用户提供安全、可靠、优质电能的关键职责^[1]。科学合理地评估城市配电网的最大供电能力对于优化系统网架结构及指导城市电网的规划和运行具有巨大的经济价值和现实意义^[1-3]。

目前计算配电网供电能力的方法主要有以最大最小负荷倍数法^[4]、网络最大流法^[5]和变压器容载比法^[6]为代表的传统方法, 数学优化方法^[7-8]及基于

$N-1$ 安全准则和主变互联的新方法^[9-10]。传统方法虽然深入到变电站馈线层面评价配电网的供电能力, 但是计算方法一般比较繁琐, 在网络结构比较复杂的情况下不一定能得到准确的结果。数学优化方法着眼于建立配电网供电能力的优化模型, 如文献^[7]提出了一种求解配电网最大供电能力的线性规划模型。该方法基于直流潮流计算, 以网络能供应的最大负荷为目标函数, 虽然能够提高计算速度, 但是忽略了母线电压幅值的变化以及线路的电阻。文献^[8]提出一种基于信赖域法的城市电网最大供电能力计算方法。该方法基于交流潮流计算, 以网络最大负荷供电能力为目标函数, 并考虑了线路热稳定、变压器容量等约束条件。该方法需要在每一个搜索点采取参数摄动法对目标函数进行二阶等值, 等值模型的精度对结果影响较大, 并且计算的复杂度极大增加。由于上述方法^[4-8]在计算过程中没有考虑到 $N-1$ 供电安全准则, 而城市电力规划设计导则中对规划电网具备任一线路停运或者变电站一台主变退出运行时

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2013-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2012-CB215201); 国家自然科学基金重大资助项目(51190105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20112070202-0014)

Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215201), the Major Program of National Natural Science Foundation of China(51190105) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(201120702020014)

Optimal microgrid dispatch considering stochastic integration of electric vehicles

MIAO Yiqun¹, JIANG Quanyuan¹, CAO Yijia²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the statistical regularity of EV(Electric Vehicle) driving, a model of optimal microgrid dispatch in smart EV integration mode is proposed and solved by CPLEX, with which and according to the requirements of EV owners, the power of renewable energy and other loads, and the constraints of EV charging/discharging, the microgrid dispatch organization generates the optimal operating strategies for all devices in microgrid, including EVs. As an example, the dispatch of a 14-bus microgrid is optimized in random EV charging mode, off-peak EV charging mode and smart EV integration mode respectively. Results show that, EVs can be economically used in smart integration mode as the distributed energy storage devices to coordinate with the centralized energy storage devices in microgrid for load shifting.

Key words: electric vehicles; model buildings; microgrid; optimal dispatch; MILP