

电动汽车规模化接入配电网的充电优化

杨秀菊,白晓清,李佩杰,韦 化

(广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530004)

摘要: 将配变台区下的电动汽车看成一个小“集聚体”,提出基于配电网安全运行的充电优化问题模型,该模型以有功网损最小为目标函数,计及节点电压、线路潮流、配变容量、集中式充电功率的动态爬升约束以及充电能量平衡约束,优化慢充模式下“集聚体”的充电功率。分区代理商负责监控所管辖台区下每辆汽车的充电行为。采用原-对偶内点法求解该模型,IEEE 33节点系统、PG&E 69系统以及一个实际的119节点配电系统的计算结果表明该算法具有良好的收敛性和优化效果。通过动态平衡充电负荷,有效降低了系统网损,平抑了负荷波动,改善了末端电压水平,且避免了随机充电在某些时段可能造成的短时电压质量下降、馈线重载及配变过载等问题,提高了配电网运行的经济性和安全性。

关键词: 配电; 电动汽车; 充电负荷; 优化; 原-对偶内点法

中图分类号: TM 72; U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.005

0 引言

在国内外,电动汽车 EVs(Electric Vehicles)将成为实现节能减排的必然选择。调查表明^[1],90%的充电行为是发生在停车场、家庭车库等固定场所的慢充方式,未来这也将是我国家用 EVs 规模化入网的方式。配电网作为其接入端,直接与用户相连,是分配电能的主要环节,约95%的停电事故源于此,且有功损耗约占整个输配电系统的50%^[2]。EVs大规模接入必将对配电网的安全、经济运行带来巨大的挑战。

当 EVs 作为负荷通过智能设备接入配电网时,该负荷具有可控性。电网可以通过实时信息互动,对其进行负荷调度,使其作为发电调度的补充,优化系统运行。但该负荷也具有随机性和不均衡性,无序充电可能导致配网节点电压恶化,影响用电设备的正常启动和运行,甚至可导致配变严重过载、保护动作。虽然配变扩容或新增可以满足 EVs 的充电需求,但会造成资源的不合理利用。此外, EVs 随机充电还造成日负荷峰谷差的恶化,对电网的安全稳定运行带来很大的隐患。

目前已有不少 EVs 入网的研究成果。文献[3]对充电负荷进行了详细建模,采用蒙特卡洛模拟方法模拟 EVs 充电行为,计算各时段的充电需求。文献[4]将充电过程视为由低荷电状态(SOC)向高荷电状态扩散的动态过程,提出基于扩散理论的 EVs

充电负荷模型。文献[5-7]将表征充电特性的分布函数离散化,求取充电功率的期望值。文献[8]针对2个实际的配网区域进行研究,表明 EVs 的随机充电会大幅增加有功网损,指出通过优化充电降低网损的必要性。文献[6-7]以负荷波动最小为目标优化大型车辆集聚体的各时段充电功率,但研究未涉及网架结构。文献[9-10]的研究是在低压配电网层次,建立充电优化模型以优化每台车辆的充电行为。文献[11]考虑潮流及电压安全约束,建立了中压配电网的充电优化模型,但未涉及线路重载、配变过载等问题。在模型的求解方法上,文献[6]的模型调用 MATLAB 中的 SQP 工具箱求解,文献[10]将模型转化为线性规划进行求解,文献[11]将模型转化为凸二次规划问题求解。

本文计及充电起始时间及充电时长的随机性,建立充电负荷的概率模型以期求取充电需求,使模型更符合实际情况,旨在寻找一种简便、有效的方法估计充电需求;以最小化有功网损为目标函数,在满足充电需求的条件下,计及潮流、节点电压、线路和配变容量约束,建立了配电网的充电优化问题模型,采用原-对偶内点法求解,优化以配变台区为单位的 EVs 集聚体的充电行为;以3个配电系统为算例,验证所提模型及方法的合理性和有效性。

文中所建模型基于以下几点假设:

a. 依托智能电网技术,已经注册为可调度的 EVs 与电网进行实时的信息互动,能够响应电网调度的需求;

b. EVs 行程前电池均到达满电量,充电过程中,充电速率连续可调至充满;

c. 以城市中压配电网为研究对象,三相供电平衡,可简化计算,仅对单相配线进行研究。

收稿日期:2014-12-28;修回日期:2015-04-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2013CB228205);国家自然科学基金资助项目(51167001)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228205) and the National Natural Science Foundation of China(51167001)

1 EVs 的充电负荷模型

文献[5]采用每小时充电功率的均值研究电动汽车在不同渗透率下对系统日负荷曲线的影响。文献[12]根据求取的 EVs 每小时消耗电能的期望值,乘以行驶的电动汽车数量得到每个调度时段电动汽车的总的电能需求。文献[13]采用蒙特卡洛模拟法和计算充电功率期望值的概率建模法计算同一情境下的充电负荷,对比了 2 种方法的求解精度和计算时间,表明两者计算精度大体一致,误差较小,但是前者计算耗时 3312.9998 s,后者仅需 0.0487 s,后者大幅提高了计算效率。

为方便研究,以 Nissan Altra 的锂离子电池为例,假设 EVs 均为该类型电池,容量为 32.78 kW·h,充电时长为 5 h,平均充电功率约为 6.5 kW^[14]。

本文针对面向居民生活负荷供电的城市配电网, EVs 的充电方式为慢充,地点基本固定。行驶路程及行程结束时刻的概率密度函数 PDF(Probability Distribution Function)见文献[3]的式(1)、(2)。假设随机盲充状态下,行程结束后即开始充电,充电起始时间的 PDF 即行程结束时刻的 PDF。

假设电池耗电量随行驶路程线性变化,则所需充电时长的表达式如下:

$$k = \frac{d}{d_{\max}} T_c \quad 0 < d < d_{\max} \quad (1)$$

其中, k 为充电时长; T_c 为电池荷电状态从 0 至充满所需总时长; d 为日行驶路程,其服从对数正态分布^[3],其均值和标准差分别为 μ 、 σ ; d_{\max} 为最大行驶路程。可得车辆行驶 1 d 后所需充电时长的 PDF 表达式为:

$$h(k) = \frac{1}{k\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-[\ln(kd_{\max}) - \ln T_c - \mu]^2 / (2\sigma^2)} \quad 0 < k < T_c \quad (2)$$

为预测各时段充电负荷,将充电起始时间及充电时长的连续分布函数以 1 h 为单位离散化^[15]。

当 $0 < t \leq T_c$ 时,单个电池在 t 时刻充电的概率还要受前一天晚上的充电行为的影响;当 $T_c < t \leq 24$ 时,只受当日先前 k ($0 < k \leq T_c$) 时段的充电行为的影响。假设充电起始时间和充电时长是相互独立的变量。综上,可写出 t 时刻充电的概率 $\xi(t)$ 的表达式如下:

$$\xi(t) = \begin{cases} \sum_{k=1}^{t-1} \sum_{b=0}^{k-1} f_p(t-k+b) h_p(k) + \\ \sum_{k=t}^{T_c} \sum_{b=0}^{k-1} f_p(t+24-k+b) h_p(k) & 0 < t \leq T_c \\ \sum_{k=1}^{T_c} \sum_{b=0}^{k-1} f_p(t-k+b) h_p(k) & T_c < t \leq 24 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $f_p(x)$ 为 x 时段开始充电的概率; $h_p(k)$ 为充电时长为 k 的概率。将充电起始时刻及充电时长的连续分布函数分别以 1 h 为单位离散化^[15]可得到 $f_p(x)$ 及

$h_p(k)$ 。假设 EVs 电池的充电特性相同,第 i 个集聚体的可调度车辆数目为 N_{Ei} ,各辆 EV 在 t 时刻的充电功率用 $P_{EV1}(t)$ 、 $P_{EV2}(t)$ 、 \dots 、 $P_{EVN_i}(t)$ 表示,为 N_{Ei} 个独立同分布的随机变量^[5,12-13]。则 t 时刻 EVs 的期望充电功率为:

$$E_i(t) = \sum_{n=1}^{N_{Ei}} P_{EVn}(t) = N_{Ei} \xi(t) P_{\text{aver}} \quad (4)$$

其中, $P_{\text{aver}} = 6.5$ kW 为平均充电功率。

2 EVs 优化充电策略

2.1 充电优化模型

配电网的降损一直是备受关注的问题,在保证系统安全运行的前提下,通过优化调度各时段 EVs 充电负荷,降低系统有功网损,提高运行经济性。

$$\min_{t=1}^T \left[\sum_{(i,j) \in S_L} P_{\text{loss}}(U_{i,t}, U_{j,t}, \delta_{ij,t}) \right] \Delta t \quad (5)$$

$$P_{\text{loss}}(U_{i,t}, U_{j,t}, \delta_{ij,t}) = G_{ij}(U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t} \cos \delta_{ij,t})$$

其中, S_L 为所有支路集合; T 、 Δt 分别为研究周期和研究时间段间隔; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别为 t 时刻支路的首、末端电压幅值; $\delta_{ij,t} = \delta_{i,t} - \delta_{j,t}$ 为 t 时刻支路的首、末端电压相角差; G_{ij} 为互导纳的实部。

(1) 等式约束条件。

a. 节点功率平衡方程:

$$\begin{cases} U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \cos \delta_{ij,t} + B_{ij} \sin \delta_{ij,t}) + P_{Li,t} + P_{Ei,t} - P_{Gi,t} = 0 \\ U_{i,t} \sum_{j \in i} U_{j,t} (G_{ij} \sin \delta_{ij,t} - B_{ij} \cos \delta_{ij,t}) + Q_{Li,t} + Q_{Ei,t} - Q_{Ri,t} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $j \in i$ 表示与节点 i 存在相连支路的节点 j ; $i \in S_B$, S_B 为所有节点的集合; $P_{Gi,t}$ 、 $Q_{Ri,t}$ 分别为 t 时刻电源点的有功、无功出力; $P_{Li,t}$ 、 $Q_{Li,t}$ 分别为 t 时刻负荷节点 i 的有功和无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为互导纳的实部和虚部; $P_{Ei,t}$ 为 t 时刻节点 i 的充电功率, $Q_{Ei,t}$ 为充电过程中引入的无功功率,功率因数为 0.95。

b. 充电能量平衡方程。

优化后的各时段充电功率之和等于该节点 EVs 集聚体的日充电需求。

$$\eta \sum_{t=1}^T (P_{Ei,t} \Delta t) = \sum_{t=1}^T (E_i(t) \Delta t) \quad i \in S_B \quad (7)$$

其中, $\eta = 0.92$ 为充电效率^[16]。

(2) 不等式约束条件。

a. 节点电压满足电压质量要求。

$$\underline{U}_{i,t} \leq U_{i,t} \leq \bar{U}_{i,t} \quad i \in S_B \quad (8)$$

b. 为避免配变长期过载运行,新增负荷需保证各节点负荷不超过其配变允许接入的最大有功负荷。

$$P_{Li,t} + P_{Ei,t} \leq \rho \cos \psi S_i \quad i \in S_B \quad (9)$$

c. 为避免线路过载,馈线潮流应满足线路容量约束。

$$|P_{ij,t}| \leq \bar{P}_{ij} \quad (i,j) \in S_L \quad (10)$$

d. 由于各负荷节点的 EVs 数量有限,优化后任意时段的充电功率不得超过该节点的所有 EVs 同时充电的负荷,且考虑充电过程中的能量损失,在电网送能和 EVs 受能之间存在一个充电能量转换效率。

$$0 \leq \eta P_{Ei,t} \leq N_{Ei} P_{\max}^{\text{chg}} \quad i \in S_B \quad (11)$$

e. 充电功率的动态爬升约束。由于电池技术本身的要求以及考虑充电对电网的冲击性,不希望各时段间充电功率大范围波动,波动范围设为最大充电功率的 20%。

$$-\Delta_{ci} \leq P_{Ei,t+1} - P_{Ei,t} \leq \Delta_{ci} \quad i \in S_B \quad (12)$$

其中,带“-”、“_”变量为变量约束的上、下限值; S_i 为节点 i 配变的视在功率; $\cos \psi$ 为功率因数,取值 0.8; ρ 为配电变压器效率,取值 0.95; $P_{ij,t}$ 为流过支路 (i,j) 的有功潮流; N_{Ei} 为集中在配电节点 i 处的 EVs 集聚体的可调度车辆数量; $\Delta_{ci} = 20\% N_{Ei} P_{\max}^{\text{chg}}$ 。

2.2 EVs 充电优化调度的实现

随着配电网智能化的进一步发展,分区下达调度指令有望实现,将配电网的入网 EVs 进行分区管理,各代理商负责监控其管辖区内的可调度车辆,如图 1 所示。在充电接口安装智能充电装置,车辆可方便地响应调度指令,并采用一定的激励政策引导用户积极参与互动。以 Agent 2 为例,说明 EVs 充电优化调度的思想:Agent 2 负责管辖监控 7—18 号配变的入网 EVs 的充电,每台配变下 EVs 集聚体优化后的各时段充电负荷从模型中已求出;借鉴文献[17]中的分布式优化控制策略,代理商监控这些配变下每台车辆的充电时间及充电功率,使其满足各个配变节点各时段充电负荷。EVs 用户响应代理商的调度控制命令。

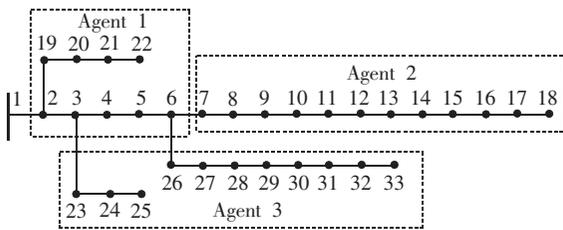


图 1 IEEE 33 节点系统的网络拓扑图
Fig.1 Topology of IEEE 33-bus system

3 原-对偶内点法

模型考虑了不同时间断面的耦合性,属于动态潮流优化问题,求解规模大,复杂程度高,对算法的要求也愈高。基于扰动 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件的原-对偶内点法[18]具有较强的鲁棒性,计算速度快,对初值不敏感,且迭代次数与系统规模无关,在求解电力系统优化问题中已得到广泛应用。算法求

解思路如下:引入松弛变量将不等式约束转化为等式约束,利用拉格朗日法将带约束的优化问题转化为无约束优化问题;为避免在可行域边界出现粘滞现象,引入扰动因子,保证迭代点始终位于可行域内部,推导加扰动的 KKT 条件;牛顿法求解 KKT 条件的修正方程,其高度稀疏性会导致 MATLAB 求解时极大耗费时间,为提高计算效率,将其化为简约修正方程[18]再求解。

4 算例仿真

假设 IEEE 33 节点系统为一条城市配线,共 929^[11] 户居民。选取基准功率 100 MV·A,基准电压 12.66 kV,该配线的最低电压要求为 0.96 p.u.。假设外部电网有足够大的有功、无功调节能力,可将电源点作为平衡节点,电压设为 1.05 p.u.,其余为 PQ 节点。将渗透率定义为可调度 EVs 数量与私家车总量的比值。

算法采用 MATLAB 语言编写程序,在 Lenovo (2.7 GHz,4G)/PC 机上完成仿真,收敛精度设为 10⁻⁵。系统拓扑图及负荷数据见图 1 和表 1。

表 1 IEEE 33 节点系统负荷
Table 1 Loads of IEEE 33-bus system

时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW	时刻	负荷/kW
01:00	1625.3	09:00	3018.4	17:00	2321.9
02:00	1741.4	10:00	3250.6	18:00	3018.4
03:00	1973.6	11:00	3482.8	19:00	3482.8
04:00	2205.8	12:00	3250.6	20:00	3715.0
05:00	2321.9	13:00	3018.4	21:00	3018.4
06:00	2554.1	14:00	2879.1	22:00	2554.1
07:00	2670.2	15:00	2786.3	23:00	2089.7
08:00	2786.3	16:00	2438.0	24:00	1857.5

4.1 负荷分析

a. 充电负荷优化结果。

50% 渗透率下典型节点优化充电负荷如图 2 所示,可见,充电发生在负荷低谷时段,在峰荷时段几乎不发生充电行为,有效起到“填谷”的作用,避免了峰值叠加。

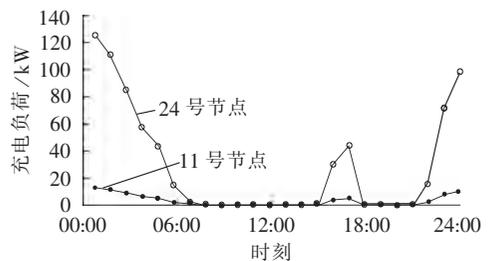
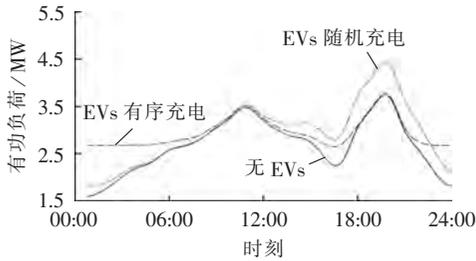


图 2 50% 渗透率下典型节点优化充电负荷
Fig.2 Optimal charging loads of typical node with 50% penetration

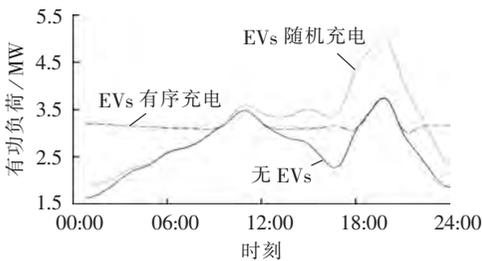
b. 系统负荷分析。

50%、100% 渗透率下负荷曲线分别如图 3 所

示,由图可见,无 EVs 接入时,系统负荷曲线是典型的双峰曲线,在 11:00、20:00 出现午高峰及晚高峰,负荷波动较大;而 EVs 的随机接入充电,使得峰值叠加,在晚高峰尤为严重,恶化了系统负荷曲线;在有序充电情况下,充电负荷集中在谷荷时段,有效避免了峰荷的叠加。随着渗透率的增加,有序充电使负荷曲线逐渐趋于平滑,提高了系统运行的经济性。



(a) 50% 渗透率



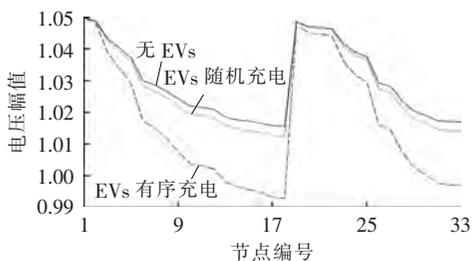
(b) 100% 渗透率

图 3 负荷曲线

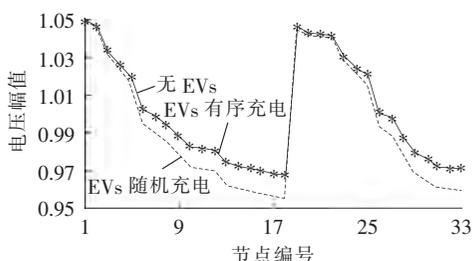
Fig.3 Load curves

4.2 电压分析

50% 渗透率下 01:00、20:00 系统电压(标么值)如图 4 所示,在 01:00,有序充电的电压幅值反而低于随机充电。有序充电情况下,会调度较多的 EVs 在该时刻充电,引入了较大的充电负荷,造成整个系统



(a) 01:00



(b) 20:00

图 4 50% 渗透率下系统电压

Fig.4 Node voltages of system with 50% penetration

节点电压下降。但该时刻系统最低电压为 0.993 p.u., 仍满足系统节点电压的要求。在 20:00,有序充电情况下几乎无充电行为发生,节点电压曲线与未接入 EVs 时的重合。而随机充电使电压曲线大幅降低,最低值出现在系统末端 18 号节点,为 0.954 p.u.,无法满足该系统对电压质量的要求;有序充电时该节点电压为 0.968 p.u.,相比于无序充电,末端电压上升了 1.4%,提高了末端节点的电压水平,满足系统电压质量要求。

50% 渗透率下 18 号节点的电压(标么值)如图 5 所示,由图可见,有序充电使得末端 18 号节点各时刻的电压曲线更加平缓,提高了负荷高峰时段的电压,降低低谷时段的电压,减小了电压差。随机充电大幅恶化了配网末端节点电压的特性。

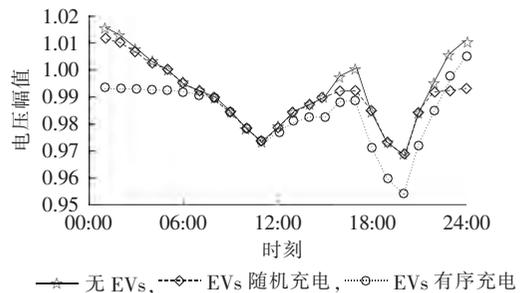


图 5 50% 渗透率下 18 号节点的电压曲线

Fig.5 Voltages of bus 18 with 50% penetration

4.3 潮流结果分析

表 2 展示了不同渗透率情况下随机充电与有序充电的潮流结果对比(表中最低电压为标么值)。结果表明:优化充电状态下,系统最低电压始终为 0.968 p.u.,保证了该系统电压的质量要求,不会造成系统电压的恶化。而随机充电下,随渗透率的增加,电压逐渐降低,甚至不能满足系统电压要求。当 100% 接入时,有序充电相比于随机充电,一日内可减少电能损耗 190.5 kW·h。可估算,该系统一年可节约电量约 69 532.5 kW·h。对于整个电网,通过优化调度充电产生的效益将非常可观。

表 2 多种渗透率下随机充电与有序优化充电结果对比

Table 2 Comparison between random charging and optimized charging for different penetrations

渗透率/%	最低电压		电能损失/(kW·h)		百分比/%
	随机充电	有序充电	随机充电	有序充电	
20	0.962	0.968	2445.1	2397.7	1.94
50	0.954	0.968	2720.2	2627.2	3.42
100	0.939	0.968	3241.9	3051.4	5.88

注:百分比是指有序充电相对于随机充电降低系统损耗的百分比。

该配线的电压要求不低于 0.96 p.u.;当线路潮流超过未接入 EVs 情况下平均潮流的 50% 时,认为线路重载;节点有功负荷超过式(9)的上限时判定为配

变过载。表 3 给出了峰荷 20:00 在随机充电和优化充电下的运行状况,以节点电压越限、线路重载、配变过负荷的数量与相应总数量的比值表示。结果表明,随机充电情况下,在峰荷时段会出现短时电压越限、线路重载、配变过载,优化后则避免了上述状况发生。

表 3 20:00 随机充电与有序优化充电下的系统运行状况

Table 3 Comparison of system operating conditions between random charging and optimized charging at 20:00

渗透率/%	电压越限		线路重载		配变过负荷	
	随机充电	有序充电	随机充电	有序充电	随机充电	有序充电
20	0/33	0/33	13/32	0/32	9/32	0/32
50	8/33	0/33	32/32	0/32	12/32	0/32
100	14/33	0/33	32/32	0/32	31/32	0/32

注:(*/*)表示(越限个数/总数量)。

采用 3 个系统验证模型的通用性及算法的有效性,由表 4 中可见,随着系统规模的增大,迭代次数并没有大幅增加,算法具有良好的收敛特性,优化降损效果显著。

表 4 50% 渗透率下 3 个系统的测试情况

Table 4 Test results of three systems with 50% penetration

测试系统	用户数	迭代次数	日网损/%	
			随机充电	有序充电
IEEE 33	929	14	3.72	3.57
PG&E 69 ^[19]	957	14	3.83	3.69
119-bus ^[20]	5678	17	4.41	4.24

5 结论与展望

采用原-对偶内点法求解配电网层次的家用 EVs 充电优化问题能有效地实现充电策略的优化计算,具有良好的收敛特性和优化效果。随着智能电网技术的进一步发展,利用本文的优化理论,还可研究配网中考虑 EVs 放电、无功优化、EVs 与其他分布式能源的最优协调出力等问题,并可适用于研究系统负荷波动方差最小、考虑分时电价情况下的车主利益最大化等不同优化目标场景。另外,本文研究对象是中压配电网层次,认为在节点配变处有一个多辆 EVs 的集聚体,在后续的工作中可研究三相低压配电网层次的 EVs 优化充电策略,将涉及到每台车辆的优化充电调度。

参考文献:

[1] 李惠玲,白晓民. 电动汽车充电对配电网的影响及对策[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):38-43.
LI Huiling,BAI Xiaomin. Impacts of electric vehicles charging on distribution grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):38-43.
[2] 钟金,郑睿敏,杨卫红,等. 建设信息时代的智能电网[J]. 电网技术,2009,33(13):12-18.

ZHONG Jin,ZHENG Ruimin,YANG Weihong,et al. Construction of smart grid at information age[J]. Power System Technology,2009,33(13):12-18.
[3] 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 statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology,2010,34(11):126-130.
[4] 刘鹏,刘瑞叶,白雪峰,等. 基于扩散理论的电动汽车充电负荷模型[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):30-35.
LIU Peng,LIU Ruiye,BAI Xuefeng,et al. Charging load model based on diffusion theory for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):30-35.
[5] 宫鑫,林涛,苏秉华. 插电式混合动力电动汽车充电对配电网的影响[J]. 电网技术,2012,36(11):30-35.
GONG Xin,LIN Tao,SU Binghua. Impact of plug-in hybrid electric vehicle charging on power distribution network[J]. Power System Technology,2012,36(11):30-35.
[6] PENG Z,KEJUN Q,CHENGKE Z,et al. A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(3):1628-1636.
[7] KEJUN Q,CHENGKE Z,ALLAN M,et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2):802-810.
[8] PIeltaIN F L,ROMÁN T G S,COSENT R,et al. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(1):206-313.
[9] CLEMENT-NYNS K,HAESEN E,DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):371-380.
[10] RICHARDSON P,FLYNN D,KEANE A. Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):268-279.
[11] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):11-18.
ZHAN Kaiqiao,SONG Yonghua,HU Zechun,et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(31):11-18.
[12] 王贵斌,赵俊华,文福拴,等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):22-29.
WANG Guibin,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(19):22-29.
[13] 张振夫. 电动汽车充电负荷对配电系统影响与优化策略[D]. 长沙:湖南大学,2013.
ZHANG Zhenfu. The impact of electric vehicles charging load on distribution system and optimization method[D]. Changsha: Hunan University,2013.
[14] PIAO T,JEEVARAJAN J,BRAGG B,et al. Performance evaluation of lithium ion cell[C]//Proceedings of the Battery Conference on Applications and Advances. St Louis, Missouri,

- USA;IEEE,1999:101-105.
- [15] 王家华,刘炳. 用于风险分析的一种连续概率分布离散化的方法[J]. 西安石油大学学报;自然科学版,2005,20(2):83-85.
WANG Jiahua,LIU Bing. A method of the discretization of continuous probability distribution for risk analysis[J]. Journal of Xi'an Shiyou University;Natural Science Edition,2005,20(2):83-85.
- [16] ASHTARI A,BIBEAU E,SHAHIDINEJAD S,et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(1):341-350.
- [17] 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):47-53.
WANG Jian,WU Kuihua,LIU Zhizhen,et al. Impact of electric vehicle charging on distribution work load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):47-53.
- [18] 韦化,李滨,杭乃善,等. 大规模水火电力系统最优潮流的现代内点理论分析[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):9-12.
WEI Hua,LI Bin,HANG Naishan,et al. An analysis of interior point theory for large-scale hydrothermal optimal power flow problems[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):9-12.
- [19] 刘国威,孙秋野,张化光. 配电系统非恒功率负荷潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):22-28.
LIU Guowei,SUN Qiuye,ZHANG Huaguang. Unconstant power load model flow calculation in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):22-28.
- [20] ZHANG Dong,FU Zhengcai,ZHANG Liuchun. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. Electric Power Systems Research,2007,77(5-6):685-694.

作者简介:



杨秀菊

杨秀菊(1990—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统最优化(E-mail:xiujuy@163.com);

白晓清(1969—),女,广西南宁人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统最优化(E-mail:baixq@gxu.edu.cn);

李佩杰(1983—),男,山东潍坊人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统最优化

(E-mail:lpeijie@gxu.edu.cn)。

Charging optimization of massive electric vehicles in distribution network

YANG Xiuju,BAI Xiaoqing,LI Peijie,WEI Hua

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology,
Guangxi University,Nanning 530004,China)

Abstract: An EVs(Electric Vehicles) charging optimization model based on the safe operation of distribution network is proposed,which takes the EVs in a distribution transformer district as a small “assembly”,the minimum power loss as its objective and the node voltage,line power flow,distribution transformer capacity,charging power increase and charging energy balance as its constraints to optimize the charging power of the “assembly” in the slow charging mode. The district service provider is responsible for the supervision of EV charging behaviour. The primal-dual interior point method is adopted to solve the model. The calculative results of IEEE 33-bus system,PG&E 69 system and an actual 119-bus system show the excellent convergency and optimization effect of the algorithm. The dynamically balanced charging power effectively reduces the network loss,smoothes the load fluctuation,improves the terminal voltage level,avoids the short-term voltage quality decline,feeder heavy load and distribution transformer overload,and improves the economy and security of distribution network operation.

Key words: electric power distribution; electric vehicles; charging load; optimization; primal-dual interior point method