

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.011

考虑主动响应的电动汽车充电站-配电网协同规划

张娅婷, 陈中, 段然, 黄学良

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:在考虑电动汽车主动充电响应的基础上,提出了电动汽车充电站-配电网协同规划模型。电动汽车作为典型直流负荷,具有主动响应特性,将之作为规划考虑因素,对电动汽车进行分时段电价调整,引导用户主动响应充电电价变化,由峰时充电向平时和谷时转移,可降低变电容量。另外,利用直流馈线代替部分交流馈线以满足电网中增加的直流负荷,降低电网中的馈线投资,共同降低了总规划成本。最后采用混合整数线性规划方法,通过CPLEX对该优化问题进行求解,并通过13节点配电网系统对交流配网和交直流配网分别进行了对比分析,对所提方法进行了仿真验证。

关键词:配电网;主动响应;协同规划;电动汽车

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0071-07

0 引言

近年来,清洁能源得到大力发展,电动汽车接入量越来越大,预计在2020年能达到2000万辆,若能实现对电动汽车主动响应管理,将会使配电网规划容量降低,配网总规划成本下降。目前,电动汽车的研究主要集中在电动汽车在交流配网中的规划^[1-4]。随着电动汽车快充等直流负荷接入量不断增加^[5],传统的交流配网规划成本将会上升,未来可以考虑构建新型的交直流混联配网用以满足日益增加的直流负荷。目前交直流配网的研究主要集中在运行控制策略方面^[6-9],实际研究交直流配电网网架规划的较少,近两年才有所研究,但研究重在将分布式能源与交直流配网相结合,将电动汽车作为一种常规负荷处理。

文献[10]研究了含电动汽车有序充放电、分布式能源的微电网规划。文献[11]研究了电动汽车充电负荷在主动配电网中的协同规划。文献[12]提出了交直流微网运行控制策略及优化配置。文献[13]研究了交直流配电网中柔性直流输电技术。文献[14]在考虑分布式能源高渗透率情况下,比较了交流配电系统和交直流配电系统的经济性能。文献[15]提出了含分布式能源的交直流配网双层规划模型。文献[16]提出了基于遗传算法的交直流混联配电系统随机规划求解模型。以上文献均未能将电动汽车主动充电响应与未来交直流配网

结合。若能将电动汽车充电站作为可调负荷参与到交直流配网中,在交直流配网中发挥电动汽车的负荷协调作用,一方面电动汽车主动响应可使电网负荷需求容量得到降低,使变电站建设成本、充电站建设成本降低;另一方面用直流馈线代替部分交流馈线可以使线路建设成本降低,总规划成本降低,对于配电系统经济性具有重要意义。

基于以上考虑,文中提出电动汽车充电站-配电网规划模型,该模型充分考虑经济性指标和充电需求、功率平衡、电压上下限、线路容量、换流器容量以及逻辑约束。首先,基于用户对电价的敏感性提出电动汽车主动响应模型,其次,在考虑电动汽车主动响应基础上建立电动汽车充电站-配电网协同规划模型,然后对所提出的协同规划模型进行13节点配网系统算例分析;最后得出结论。

1 电动汽车主动响应模型

电动汽车在充电站充电时,电网可通过分时电价对用户进行充电行为引导,使电动汽车充电由用电峰时向平时、谷时转移,从而实现电网用电负荷峰值降低,最大限度利用谷时段进行充电^[17-20]。从消费者心理出发,电价对用户充电影响可分为3个部分:(1)死区,峰平谷之间电价差较小,用户基本不响应电价变化;(2)线性区,电价差设置合理,用户响应电价变化,其响应程度与电价差大小成正比;(3)饱和区,电价差过大,用户达到响应极限。

基于以上分析,对车主通过电价补贴方式使车主主动响应电价差,利用价格响应曲线分别对峰平转移、峰谷转移、平谷转移方式进行建模,此处以峰时段向谷时段进行转移说明主动响应模型,峰谷转

收稿日期:2019-03-13;修回日期:2019-04-26

基金项目:国家电网有限公司科技项目“支撑能源变革发展的主配用多维度联合态势感知技术研究及应用”(J20180-74)

移模型如图 1 所示。峰平转移、平谷转移曲线与图 1 形状相同。

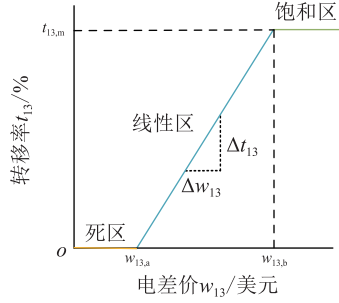


图 1 峰谷时段电价差-转移率曲线

Fig.1 Electricity price difference-transfer rate curve in peak-valley period

由图 1 可以得到峰谷时段转移模型如式(1):

$$t_{13} = \begin{cases} 0 & 0 \leq w_{13} \leq w_{13,a} \\ \frac{\Delta t_{13}}{\Delta w_{13}}(w_{13} - w_{13,a}) & w_{13,a} < w_{13} < w_{13,b} \\ t_{13,m} & w_{13} \geq w_{13,b} \end{cases} \quad (1)$$

式中: w_{13} , $w_{13,a}$, $w_{13,b}$ 分别为峰谷电价差、死区、饱和区临界值; t_{13} 为峰谷用户转移率,代表用户由峰时充电转为谷时充电,相应负荷也从峰时向谷时转移; $t_{13,m}$ 为最大转移率。

引入电动汽车主动响应率 η , 表示在该区域内电价差的引导下,主动响应参与有序充电电动汽车数量占电动汽车总数的比例。进行电动汽车主动响应管理后,充电站的充电负荷如式(2)。

$$X_{i,2} = \begin{cases} X_{1,1} - \eta t_{12} X_{1,1} - \eta t_{13} X_{1,1} & i = 1 \\ \eta t_{12} X_{1,1} + X_{2,1} - \eta t_{23} X_{2,1} & i = 2 \\ \eta t_{13} X_{1,1} + \eta t_{23} X_{2,1} + X_{3,1} & i = 3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_{12} , t_{23} , t_{13} 分别为峰平,平谷,峰谷时段负荷转移率; $X_{1,1}$, $X_{2,1}$, $X_{3,1}$ 为各时段(峰、平、谷)主动响应引导前起始充电车辆; $X_{i,2}$ 为各时段进行主动响应引导后充电车辆。

以峰谷时段为例,峰时向谷时进行负荷转移,其转移成本是转移率对电价差的积分,如式(3)。

$$C_{\text{erd},13} = \int_0^{t_{13}} \left(\frac{t_{13}}{\Delta t_{13} / \Delta w_{13}} + w_{13,a} \right) dt_{13} \quad (3)$$

由式(3)可以看到转移成本和转移量之间的非线性。为简化模型,方便通过 CPLEX 对模型进行求解,可采用分段线性化处理将其转化为分段线性函数。文中针对充电负荷转移成本,可从峰、平、谷 3 个时段进行考虑,不失一般性假设每个时段均为 8 h 对模型进行简化分析。

2 协同规划模型

2.1 目标函数

文中主要分析及主动响应的电动汽车充电站-配电网协同规划模型下交直流混联配网的经济性,优化目标为配电网和充电站总体建设、运行费用最小化。与此同时,规划过程中需要考虑满足常规负荷、电动汽车充电负荷的用电需求。另外,考虑到在电压等级较低的时候,配电网 DC-DC 换流器相比于 AC-DC 换流器而言,成本比较低,文中不考虑 DC-DC 模块^[21]。具体优化目标如下:

$$\min \mathbf{F} = [f_{\text{inv}} \quad f_{\text{opr}}]^T \quad (4)$$

式中: \mathbf{F} 为配网规划总成本; f_{inv} 为建设投资成本; f_{opr} 为运行成本。现对以下优化目标进行分析。

2.1.1 建设投资成本 f_{inv}

建设投资成本包括变电站建设成本、交直流线路建设成本、换流器建设成本和充电站建设成本。具体表达如式(5)所示:

$$\begin{cases} f_{\text{inv}} = C_{\text{sub}} + C_{\text{line}} + C_{\text{VSC}} + C_{\text{charg}} \\ C_{\text{sub}} = \sum_{s \in D^s} c_s P_{\text{sub}} x_s \\ C_{\text{line}} = \sum_{n \in D^l} [c_{n,\text{ac}} d_n (1 - x_n) + c_{n,\text{dc}} d_n x_n] \\ C_{\text{VSC}} = \sum_{p \in D^l} c_p v_p x_p \\ C_{\text{charg}} = \sum_{q \in D^l} (c_1 x_q + c_2 P_q) \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_{sub} , C_{line} , C_{VSC} , C_{charg} 分别为变电站建设成本,交直流线路建设成本,换流器建设成本,充电站建设成本。在变电站建设成本中, D^s 为变电站节点集合; c_s 为 s 节点建设变电站单位成本; P_{sub} 为变电站建设容量; x_s 为 0-1 决策变量, s 节点建设变电站时取 1,否则为 0。在线路建设成本中, D^l 为馈线集合; $c_{n,\text{ac}}$, $c_{n,\text{dc}}$ 分别为第 n 条线路为交流,直流馈线单位成本; d_n 为第 n 条线路长度; x_n 为 0-1 决策变量,选择交流馈线时取 0,直流馈线取 1。在换流器建设成本中, D^l 为负荷节点集合; c_p 为 p 节点安装换流器单位成本; v_p 为 p 节点换流器容量; x_p 为 0-1 决策变量, p 节点安装换流器时取 1,否则为 0。在充电站建设成本中, c_1 , c_2 分别为充电站建设的固定成本和可变成本; x_q 为 0-1 决策变量, q 节点新建充电站时取 1,否则为 0。 P_q 为 q 节点上安装的充电站的容量大小。

2.1.2 运行成本 f_{opr}

运行成本包括为了使电动汽车主动响应电价变化进行负荷转移而增加的电动汽车主动响应管理成本、充电站运行成本和电网运行维护费用。具

体表达如式(6)所示。

$$\begin{cases} f_{\text{opr}} = C_{\text{crd}} + C_{\text{chg}} + C_{\text{RC}} \\ C_{\text{crd}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 C_{\text{crd},ij} \times 365 \times 15 \\ C_{\text{chg}} = \sum_{q \in D^L} \sum_{k \in I^{1,2,3}} c_{q,k}^{\text{EV}} P_{q,k}^{\text{EV}} T_p \\ C_{\text{RC}} = \sum_{t=1}^{T_p} \frac{\delta(C_{\text{sub}} + C_{\text{line}} + C_{\text{VSC}})}{(1+d)^t} \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_{crd} , C_{chg} , C_{RC} 分别为电动汽车主动响应管理成本,充电站运行成本,电网运行维护费用。在电动汽车主动响应管理成本中,考虑模型复杂度和实际运行工况,将1 d内充电负荷分为3段,峰、平、谷均包含8 h, $C_{\text{crd},ij}$ 为1 d内各时段负荷转移成本。在充电站运行成本中, $I^{1,2,3}$ 为峰、平、谷时段集合; $c_{q,k}^{\text{EV}}$, $P_{q,k}^{\text{EV}}$ 分别为 q 节点 k 时段电动汽车有序充电服务单位成本、负荷大小。在电网运行维护费用中, T_p 为规划年限; δ 为年运行维护费用百分比; d 为折损率。

2.2 约束条件

对于充电站内电动汽车主动响应管理,其约束条件在峰、平、谷都要得到满足,同时满足规划的其他安全约束。

2.2.1 充电需求约束

充电站应满足规划区域内电动汽车充电需求。

$$\sum_{q \in D^L} P_q^{\text{EV}} \leq \sum_{q \in D^L} P_q \quad (7)$$

2.2.2 功率平衡约束

为降低计算复杂度,采取线性潮流进行计算,将功率平衡约束简化为电压平衡约束和电流平衡约束。首先是电压平衡约束,约束条件如式(8):

$$-A(1 - X_n) \leq Z_n I_n + Q_n V_m \leq A(1 - X_n) \quad \forall n \in D^l \quad (8)$$

式中: Z_n 为第 n 条线路阻抗; I_n 为第 n 条线路上的电流; V_m 为网络各节点电压构成的列向量; X_n 为0-1决策变量,1表示第 n 条线路投入使用; A 为一足够大的实数。其次是电流平衡约束,约束条件如式(9):

$$Q I_n + I_s = r_m + P_q^{\text{EV}} \quad (9)$$

式中: Q 为节点与线路之间的关联矩阵,表示各网络节点电流注入,其矩阵只包含-1、0、1 3个取值; I_s 为 s 变电站节点注入功率; r_m 为第 m 个节点上的常规负荷需求。

2.2.3 节点电压约束

对于配电网中的节点,节点电压均需满足电压幅值上下限约束。

$$0.95V_N \leq V_m \leq 1.05V_N \quad \forall m \in D \quad (10)$$

式中: V_N 为电网额定电压; D 为所有网络节点集合。

2.2.4 线路容量约束

对于网络中的馈线,馈线上的最大电流应小于馈线容量。

$$|I_n| \leq X_n I_{n,m} \quad \forall n \in D^l \quad (11)$$

式中: $I_{n,m}$ 为第 n 条线路上最大允许电流。

2.2.5 换流器容量约束

$$v_p \leq v_{p,m} \quad \forall c \in D^{\text{VSC}} \quad (12)$$

式中: $v_{p,m}$ 为第 p 个换流器上最大允许功率; D^{VSC} 为网络中所有换流器集合。

2.2.6 逻辑约束

对于新建线路,只能选择一种线型(交流馈线/直流馈线):

$$x_n \in \{0,1\} \quad \forall n \in D^l \quad (13)$$

一般采用辐射型网络,故可得以下约束^[22]:广义节点连通;配网线路数与除变电站外节点数相同且负荷节点仅由一条支路连接至网络约束。具体辐射约束如式(14)所示:

$$\begin{cases} y_m \leq \sum_{m \in D^L, n \in D^l} X_{mn} \leq A y_m \\ \sum_{n \in D^l} X_n = \sum_{m \in D^L} y_m - \sum_{s \in D^S} y_s \end{cases} \quad (14)$$

式中: y_m 为0-1决策变量,第 m 个负荷节点接入系统取1,否则为0; y_s 也为0-1决策变量,第 s 个变电站节点接入系统取1,否则为0。

文中所提规划模型考虑了交直流混联电网,只存在交流电网的情况也同样适用,因此也可以用于交流电网阶段的协同规划。

3 算例分析

不失一般性,文中采用13节点含交直流负荷的配网系统^[12]进行算例仿真验证,对纯交流配网和交直流混联配网进行了对比分析,具体如图2所示。

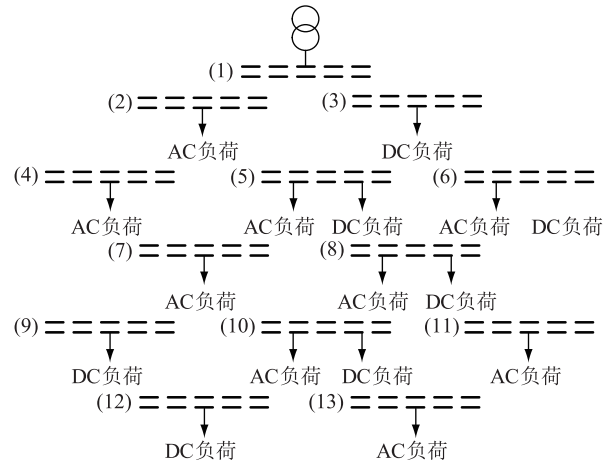


图2 13节点配网系统

Fig.2 13-node distribution network system

图2中共有13个节点,其中1号节点为变电站节点,其余节点为负荷节点,负荷节点上含有交、直流负荷,具体参数如表1所示。

表1 系统负荷需求

节点编号	峰时段负荷		平时段负荷		谷时段负荷	
	AC	DC	AC	DC	AC	AC
1						
2	1.0		0.6		0.2	
3		1.25		0.75		0.25
4	0.5		0.3		0.1	
5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.1	0.5
6	0.75	0.75	0.45	0.75	0.45	0.75
7	0.5		0.3		0.1	
8	0.5	1.25	0.3	0.75	0.1	0.25
9		0.85		0.85		0.85
10	0.5	0.5	0.3	0.5	0.1	0.5
11	0.5		0.3		0.1	
12		1.25		0.75		0.25
13	0.75		0.45		0.15	

在表1所示负荷需求基础上,在11节点新建电动汽车充电站,其电动汽车充电负荷转移曲线与文献[20]中数据相同。

算例中涉及的其他模型参数^[4, 12, 17]如表2所示,其中变电站中预留1台变压器作为备用。

表2 规划模型参数

参数	数值
额定电压/kV	10.38
变电站安装变压器成本/(万美元·台)	20
变压器额定容量/(MV·A)	8.5
变压器功率因数	1
配电网规划年限 T_p/a	15
折损率 $d/\%$	0.7
年运行维护费用百分比 $d/\%$	5
交流线路成本/(万美元· km^{-1})	1.74
直流线路成本/(万美元· km^{-1})	0.5
换流器成本/[美元·(kV·A) ⁻¹]	150
充电站固定成本/万美元	50
充电站可变成本/(万美元· kW^{-1})	7.25
原始充电需求(峰、平、谷)/MW	8.4, 5.4, 2.4
电价/美元	0.1

文中取 f_{inv} , f_{opr} 权重系数均为1,采用混合整数线性规划方法,在Matlab仿真环境下使用YALMIP工具箱,定义决策变量,并建立目标函数和约束条件的表达式,调用CPLEX软件进行求解。以下分别对纯交流配网以及交直流混联配网进行分析,结果

如表3—表6所示,文中只列出响应率60%情况下,基于电动汽车充电站-配电网协同规划模型获得的交直流混联配网馈线拓扑,如图3所示。

表3 纯交流配网规划成本

响应率/%	C_{sub}	C_{line}	C_{VSC}	C_{charg}	C_{cnd}	C_{chg}	C_{RC}	F
无序	80	34.72	16.57	110.86	0	58.69	57.94	358.78
30	80	33.6	13.51	97.35	6.82	58.69	56.10	346.07
60	60	33.6	10.79	96.72	15.29	58.69	46.07	321.16
100	60	33.6	10.79	92.23	16.28	58.69	46.07	317.66

表4 交直流混联配网规划成本

响应率/%	C_{sub}	C_{line}	C_{VSC}	C_{charg}	C_{cnd}	C_{chg}	C_{RC}	F
无序	80	19.52	27.11	110.86	0	58.69	49.23	345.41
30%	80	19.52	15.24	97.35	6.82	58.69	48.57	326.19
60%	60	19.52	11.20	96.72	15.29	58.69	39.72	301.14
100%	60	19.52	9.98	92.23	16.28	58.69	39.50	296.20

表5 各时段充电负荷

响应率/%	峰时段负荷	平时段负荷	谷时段负荷
无序	8.4	5.4	2.4
30	6.535 5	6.535 5	3.129 0
60	4.544 0	6.448 0	5.208 0
100	4.544 0	5.828 0	5.828 0

表6 主动响应补贴情况

响应率/%	主动响应补贴		
	峰-平	峰-谷	平-谷
无序	0	0	0
30	0.062 0	0.157 1	0.032 1
60	0.085 7	0.157 1	0.065 1
100	0.085 7	0.200 0	0.085 7

表3和表4分别为纯交流电网和交直流混联电网的计算结果,对比可知:

(1) 由变电站建设成本 C_{sub} 可知电动汽车主动响应率提高,电动汽车充电站进行主动有序充电管理参与度得到提高,配电系统的峰值负荷得到降低,变压器容量有所下降,在电动汽车响应率低于30%时,变电站需安装4台变压器,变压器投资达到80万美元,而当电动汽车响应率提高后,如当响应率达到60%时,变电站只需安装3台变压器,变压器投资只需60万美元,变电站投资成本降低。

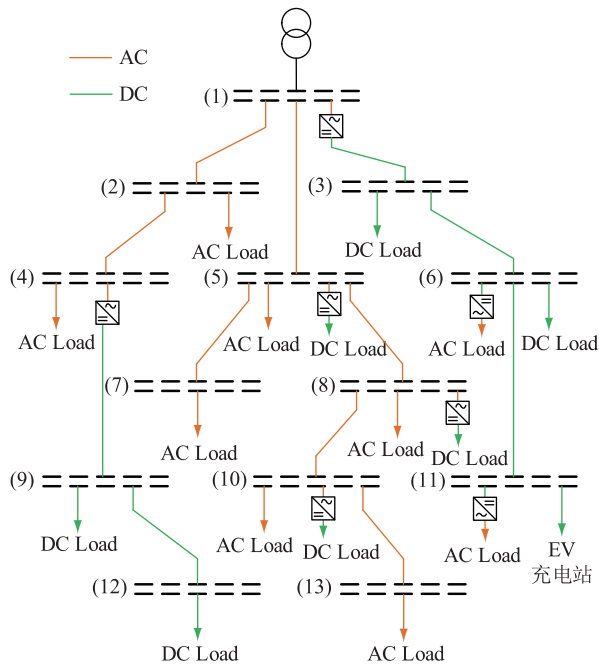


图3 交直流混联配网拓扑

Fig.3 AC/DC hybrid distribution network topology

(2) 由交直流线路建设成本 C_{line} 可知由于直流馈线单位成本低于交流馈线,因此使用交流馈线投资达到 34 万美元,而使用交直流混合馈线可使投资降到 19.52 万美元,因此交直流配网的线路成本比交流大幅降低。

(3) 由换流器建设成本 C_{vsc} 可知一方面随着电动汽车响应率的增加,充电站的规划容量可以降低,故换流器建设成本也得到了降低;另一方面,在交直流混联配网规划时,需要考虑给直流馈线供电时应在交流节点转直流节点处提供换流器,成本增加,但是由于线路成本降低较大,总体规划成本呈下降趋势。

(4) 由充电站建设成本 C_{charg} 可知主要是由固定成本和可变成本组成,可变成本与充电站容量成正比,随着电动汽车响应率增加,充电站容量由最初的 8.4 MW 下降到 5.828 MW,充电站建设成本也得到下降。

(5) 由电动汽车主动响应管理成本 C_{end} 、总规划成本 F 可知随着电动汽车主动响应率的增加,电网公司为完成负荷转移需支付更多负荷转移成本。但是负荷转移成本的增加是有限的。因此,可以发现提高电动汽车的有序充电响应率,用交直流配网规划代替交流配网规划,可以使得总规划成本由含电动汽车无序充电交流配网模型的 358.78 万美元降低到含电动汽车主动响应率为 100% 交直流配网模型的 296.20 万美元,总规划成本得到大幅度降低。

(6) 由充电站运行成本 C_{chg} 可知由于充电总负荷不变,因此充电站运行成本没有变化。

表 5 为规划后得到的各时段电动汽车充电负荷。从表 5 可见,随着电动汽车主动响应率增加,充电站安装容量呈下降趋势。充电站安装容量以充电站峰、平、谷时段最大充电负荷进行规划,无序充电时,由于峰值充电负荷大,充电站安装容量需大于 8.4 MW,导致变电站需要更多的变压器以满足负荷需求,虽然不需要充电站主动管理成本,但是主动管理成本和无序充电带来的建设投资成本的增加相比,无序充电的总规划成本最高。

表 6 为规划后得到各时段电动汽车主动响应补贴情况。从表 6 可见,在充电站进行负荷转移时,首先考虑的是将峰时段的充电负荷向平时段、谷时段进行转移,从而避开配电网用电高峰。当电动汽车响应率较高时,可降低峰时段电网用电负荷,虽然转移成本有所上升,但是整体而言,总规划成本是下降的。

4 结论

文中针对计及主动响应的电动汽车充电站-配电网,对配网规划模型进行了优化研究,在电动汽车主动响应率不同的情况下,分别对交直流混联配网规划模型和纯交流配网规划模型进行比较。研究结论如下:

(1) 当电网中存在直流负荷时,比如电动汽车这类典型的直流负荷大规模发展,如果可以采用交直流混联配网,由于直流馈线成本更低,不仅减小了配网总规划成本,还有利于系统与直流负荷之间的交互,和交流配网相比整体经济性更优。

(2) 充电站通过充电电价的变化,电动汽车车主会主动响应电价变化,充电站需求侧响应发生变化,充电负荷主动由峰时段往平、谷时段转移。该过程会导致电动汽车主动响应管理成本上升。但另一方面,电动汽车进行主动响应,峰时段充电负荷需求降低,充电站建设成本可以得到降低,而且峰时段电网总用电负荷需求也得到降低,减小了变电站内新装变压器的容量,变电站建设成本也得到降低。因此,总体而言虽然主动响应管理成本有所上升,但是由于变电站建设成本、充电站建设成本都得到大幅降低,配电网总规划成本是下降的。

(3) 随着电动汽车主动响应率的增加,电动汽车充电负荷需求容量在降低,可以降低电网总规划容量。

文中仅考虑了充电站进行主动充电管理对配

电网优化配置的影响,下一步可考虑不同地点下充电站进行主动有序充电管理时配电网规划模型的研究。

参考文献:

- [1] 李博彤,唐楷. 计及电动汽车储能特性的微电网规划模型与算法[J]. 电力建设,2017,38(2):60-65.
LI Botong, TANG Kai. Planning model and algorithm of microgrid considering energy storage characteristics of electric vehicles[J]. Electric Power Construction,2017,38(2):60-65.
- [2] 彭显刚,林利祥,刘艺,等. 计及电动汽车和可再生能源不确定因素的多目标分布式电源优化配置[J]. 电网技术,2015,39(8):2188-2194.
PENG Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Multi-objective optimal allocation of distributed generation considering uncertainties of plug-in electric vehicles and renewable energy sources[J]. Power System Technology,2015,39(8):2188-2194.
- [3] 蒋红进,蒋红彪,朱兰,等. 计及电动汽车不确定性的微电网规划研究[J]. 电测与仪表,2018,55(8):58-65,76.
JIANG Hongjin, JIANG Hongbiao, ZHU Lan, et al. Research on micro-grid planning considering uncertainty of electric vehicle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(8):58-65,76.
- [4] 陈中,段然,黄学良,等. 计及电动汽车主动充电管理的配电网与充电站协同规划[J]. 电测与仪表,2018(12):1-8.
CHEN Zhong, DUAN Ran, HUANG Xueliang, et al. Collaborative planning of distribution network and EV charging stations considering active charging management[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018(12):1-8.
- [5] 胡泽春,宋永华,徐智威. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):1-10.
- [6] 胡晓博. 含分布式能源的交直流混合配电网规划[D]. 北京:华北电力大学,2017.
HU Xiaobo. Planning of AC/DC hybrid distribution network with distributed energy resources[D]. Beijing: North China Electric Power University,2017.
- [7] 丁明,楚明娟,潘浩,等. 交直流混合微电网运行优化建模与不确定性分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(5):1-7.
DING Ming, CHU Mingjuan, PAN Hao, et al. Operation optimization modeling and uncertainty analysis for hybrid AC/DC microgrids[J]. Automation of Electric Power System,2017,41(5):1-7.
- [8] MA T, CINTUGLU M H, MOHAMMED O A. Control of hybrid AC/DC microgrid involving storage, renewable energy and pulsed loads[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2017,53(1):567-575.
- [9] RADWAN A, MOHAMED Y A R I. Assessment and mitigation of interaction dynamics in hybrid AC/DC distribution generation systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(3):1382-1393.
- [10] 段豪翔,吕林,向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(1):103-110.
DUAN Haoxiang, LYU Lin, XIANG Yue. Coordinated planning for electric vehicle charging station and distribution network considering time-of-use charging price[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2017,29(1):103-110.
- [11] 苏海锋,梁志瑞. 基于峰谷电价的家用电动汽车居民小区有序充电控制方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):17-22.
SU Haifeng, LIANG Zhirui. Orderly charging control based on peak-valley electricity tariffs for household electric vehicles of residential quarter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):17-22.
- [12] AHMED H M A, ELTANTAIEY A B, SALAMA M M A. A planning approach for the network configuration of AC/DC hybrid distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018(5):2203-2213.
- [13] 汪湘晋,赵波,吴红斌,等. 并网型交直流混合微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(13):55-62.
WANG Xiangjing, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal sizing analysis of grid-connected hybrid AC/DC microgrid[J]. Automation of Electric Power System,2016,40(13):55-62.
- [14] GHADIRI A, HAGHIFAM M R, LARIMI S M M. Comprehensive approach for hybrid AC/DC distribution network planning using genetic algorithm[J]. IET generation, transmission & distribution,2017,11(16):3892-3902.
- [15] 蒋贤强,徐青山,柳丹,等. 含分布式电源的交直流配网双层规划研究[J]. 电力工程技术,2018,37(4):27-32.
JIANG Xianqiang, XU Qingshan, LIU Dan, et al. Two-layer model of AC/DC distribution network containing DGs[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2018,37(4):27-32.
- [16] 张永超,韦钢,周健,等. 含电动汽车充电站的直流配电网规划研究[J]. 电测与仪表,2018,55(3):41-47.
ZHANG Yongchao, WEI Gang, ZHOU Jian, et al. Planning of DC distribution network containing electric vehicle charging and discharging station[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2018,55(3):41-47.
- [17] 赵兴勇,王帅,吴新华. 含分布式电源和电动汽车的微电网协调控制策略[J]. 电网技术,2016,40(12):3732-3740.
ZHAO Xingyong, WANG Shuai, WU Xinhua. Coordinated control strategy research of micro-grid including distributed generations and electric vehicles[J]. Power System Technology,2016,40(12):3732-3740.
- [18] 刘柏良,黄学良. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术,2015,39(2):450-456.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology,2015,39(2):450-456.
- [19] 余晓玲,余晓婷,韩晓娟. 基于思维进化算法的电动汽车有

- 序充电控制策略[J]. 电力工程技术,2017,36(6):58-62.
YU Xiaoling, YU Xiaoting, HAN Xiaojuan. A coordinated charging strategy for PEV charging stations based on mind evolutionary algorithm [J]. Electrical Power Engineering Technology, 2017, 36(6) :58-62.
- [20] 常方宇, 黄梅, 张维戈. 分时充电价格下电动汽车有序充电引导策略[J]. 电网技术, 2016, 40(9) :2609-2615.
CHANG Fangyu, HUANG Mei, ZHANG Weige. Research on coordinated charging of electric vehicles based on TOU charging price[J]. Power System Technology, 2016, 40(9) : 2609-2615.
- [21] 丁明, 史盛亮, 刘新宇, 等. 交直流混合微网优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14) :17-25.
DING Ming, SHI Shengliang, LIU Xinyu, et al. Study of optimal configuration of a hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14) :17-25.
- [22] 杜爱虎. 考虑电动汽车充电站布局优化的配电网规划研究[D]. 北京:清华大学, 2011.
DU Aihu. Research on distribution planning considering layout optimization of electric vehicle charging stations[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.

作者简介:



张娅婷

张娅婷(1994),女,硕士在读,研究方向为电动汽车有序充电、电网规划(E-mail:yating_zhang@seu.edu.cn);

陈中(1975),男,博士,研究员,研究方向为V2G、新能源开发与应用;

段然(1993),男,硕士在读,研究方向为电力系统规划。

Collaborative planning of electric vehicle charging station-distribution network considering active response

ZHANG Yating, CHEN Zhong, DUAN Ran, HUANG Xueliang

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Based on the active charging response of electric vehicles, this paper proposes a collaborative planning model of “electric vehicle charging station-distribution network”. As a typical DC load, the electric vehicle has the characteristics of active response which can be used as a planning consideration factor to adjust the electricity price of the electric vehicle in a time-sharing manner. Guiding the user to actively respond to the change of the charging price, and shifting charging demand from peak to off-peak periods, which can reduce substation capacity. In addition, this paper uses DC feeders to replace part of AC feeders to meet the increased DC load in the grid, reducing feeder investment in the grid, as well as the total planning cost. In the end, the mixed integer linear programming method is used to solve the optimization problem through CPLEX, the 13-node distribution network system is used to compare and analyze the AC distribution network and AC-DC distribution network respectively, and the proposed method is verified.

Keywords: distribution network; active response; collaborative planning; electric vehicle

(编辑 杨卫星)