

考虑电动汽车充电负荷空间分布的系统特性分析

张明霞, 田立亭, 杨水丽, 胡娟, 侯朝勇

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电动汽车充电的便捷、安全是电动汽车产业化的必要保障。电动汽车充电负荷具有一定的随机性和集聚性, 充电负荷接入电网的位置和容量不同, 势必给电网带来不同的影响。如何适应电动汽车充电负荷的接入成为电网建设规划中面临的重点问题之一。基于现有的电动汽车充电方式的讨论, 考虑电动汽车充电负荷随机分布和局部集中分布两种方式, 通过仿真计算, 详细研究了接入电网的电压和损耗特性, 并对关键因素进行了分析。结果显示, 接入电网的电压和损耗特性与充电负荷的分布密切相关。最后提出电动汽车充电站点设计和选址依据。

关键词: 电动汽车; 充电负荷随机分布; 局部集中分布; 电压下降; 网络损耗

Influence of electric vehicle charging load distribution on power grid

ZHANG Ming-xia, TIAN Li-ting, YANG Shui-li, HU Juan, HOU Chao-yong

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Convenience and safety of electric vehicle is essential for electric vehicle industrialization. Since electric vehicle charging load is of random and aggregation, different charging position and power affect power system in different way. Integration of EV charging load will become one of the important problems for grid plan. Based on current charging modes, this paper investigates the voltage distribution and power loss of power system with random distribution and local concentration of charging load taken into account. The simulation indicates that the voltage and power loss are both closely related with the distribution of charging load. The EV charging station design and site selection principle are proposed.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA052004).

Key words: electric vehicle; charging load random distribution; load concentration; voltage drop; power loss

中图分类号: TM911 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0086-07

0 引言

电动汽车充电的便捷、安全是电动汽车产业化的必要保障, 在我国特有的经济快速发展模式、高密度城镇化居住模式等现状下, 电动汽车充电模式和充电站点的规划设计, 必须考虑公共电网的供电质量和高效运行。

电动汽车充电负荷具有一定的随机性和集聚性^[1], 有关电动汽车充电负荷积聚特性和对电网影响的研究迅速展开, 获得的结果初步验证了电动汽车充电负荷接入电网带来的不良后果^[2-5]。基于文献[6-7]的研究, 大量充电负荷的同步接入可能引发馈电线路、变压器过载及负荷峰谷差增加等潜在问题。

文献[8]分析了充电站内部充电过程中的损耗, 给出了充电设备选型的依据。

电动汽车的充电需求受很多因素影响^[1], 其产生客观上取决于电动汽车行驶需求, 同时与用户的行为方式和行为习惯有关, 相关因素发生变化, 充电需求的时间、需求量等随之变化^[9]。另一方面, 充电负荷的最终形成与充电行为的有效实施即充电站点的规划布点密切相关。从电网运行角度而言, 充电负荷接入电网的位置和容量不同, 势必给电网带来不同的影响, 充电负荷的合理配置对电网的稳定运行至关重要。通过电动汽车充电站点的规划布点能够在空间上对充电负荷进行引导, 初步形成充电负荷的接入拓扑。实际上, 负荷的优化分配已成为提高电网运行效率的有效手段^[10]。明确电动汽车充电负荷空间分配方式的影响对电动汽车充电站点的规划和有序充电具有指导意义。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA052004); 国家电网公司科技项目(DG71-13-031)

1 计算模型

由于电动汽车的移动性和随机性, 电动汽车充电负荷包含时间和空间两个维度。文献[11]假设充电负荷在时间上的概率分布, 分析了充电负荷对电网负荷曲线的影响。文献[12]以电动汽车充电时间、路程最少为目标研究了充电负荷的空间分配方法。本文考虑电动汽车充电负荷在空间上的不同分布, 重点对配电网电压和损耗展开了分析。需要说明的是, 对电网而言, 尚未接入网络的充电需求并不形成负荷, 接入网络的充电负荷与传统负荷相似。为突出充电负荷规模化空间分布特性的影响, 避免与时间特性的耦合, 文中不考虑充电负荷的时间分布特性, 规模化效应也不需要个体电动汽车的充电需求进行细化。

由于配电网一般呈辐射状或链式结构, 故以 IEEE33 节点测试系统为模型进行分析, IEEE33 节点测试系统如图 1 所示。考虑到充电桩和充电机功率因数均在 0.9 以上, 充电过程中主要输出有功功率, 故将电动汽车充电负荷等效为恒功率有功负荷。

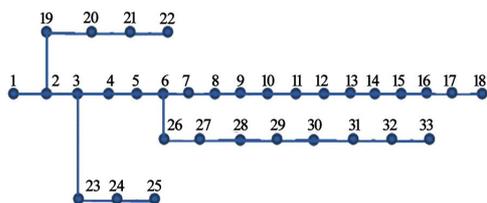


图1 IEEE33节点测试系统

Fig. 1 IEEE33 node test system

在没有引导的情况下, 电动汽车的充电负荷与用户的行为方式密切相关, 在时间上和空间上的分布呈现随机特性。对电力网络而言, 体现为给定时刻充电负荷在各节点的随机分布。结合现有关于充电方式的讨论^[9], 仿真中主要考虑充电负荷随机分布和在局部集中分布两种情况。为便于分析比较, 直观地反映线路有功损耗增量与线路所在位置的关系, 同时提供了假设充电负荷在配电网中均匀分布时的结果。

在特定的充电负荷渗透水平下, 充电负荷总量一定。均匀分布时, 充电负荷在除根节点之外的所有配电网节点平均分布, 各节点接入的充电负荷大小相等。随机分布时, 配电网各节点接入的充电负荷随机生成, 其和为充电负荷总量, 为避免局部集中, 各节点接入的充电负荷以均匀分布下各节点接入充电负荷的 150%为上限。局部集中分布主要考虑由于用户行为特性可能导致的充电负荷在某些位

置的集中, 假设 50%的充电负荷集中接入给定节点, 另外 50%的充电负荷在其他节点平均等量接入。

为表述方便, 根据测试系统的分支结构, 将其分为四条支路, 从节点 2 到节点 18 为支路 1, 从节点 2 节点 22 为支路 2, 从节点 3 到节点 25 为支路 3, 从节点 6 到节点 33 为支路 4。

2 电压分析

显然, 与没有电动汽车相比, 电动汽车充电负荷渗透率越高, 节点电压下降越大。

仿真分析结果显示, 充电负荷均匀分布时, 对于给定配电网, 当充电负荷渗透率水平达到30%时, 有两个节点电压偏差超过 -10% , 如图2所示, 不满足我国城市配电网电压质量有关电压偏差的要求。

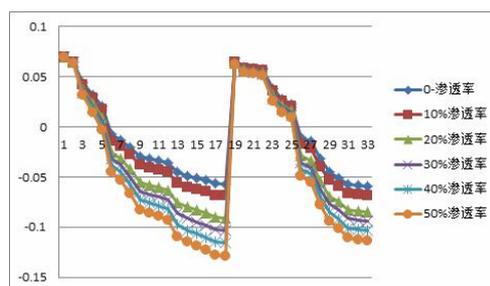


图2 节点电压偏差

Fig. 2 Node voltage deviation

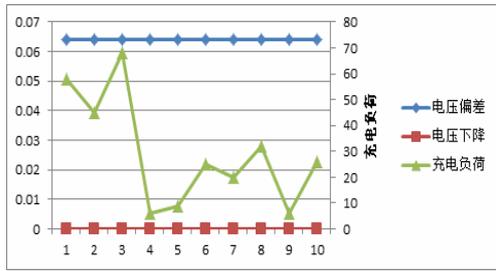
由于电动汽车充电负荷新增的有功潮流由供端延配线路向负荷端传输, 同一渗透率水平下, 根节点的电压偏移最小, 同一支路上, 随着节点与根节点电气距离的增加, 电压偏移也增加, 末节点电压偏移最大。

2.1 充电负荷随机分布

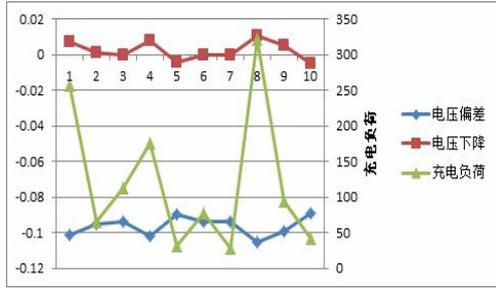
考虑电动汽车产业化的不同发展阶段, 分别在电动汽车充电负荷 10%、30%和 50%渗透率水平下进行仿真。以节点 2 和节点 33 为例, 充电负荷在各节点随机分布时, 30%渗透率下电压水平如图 3 所示。

由图 3 (a) 可见, 网络总负荷一定时, 节点 2 电压水平稳定, 不随接入负荷的大小波动。由于节点 2 紧邻电源点, 且没有其他分支, 电压偏差的大小主要取决于由根节点经由节点 2 传输的有功潮流, 即网络的总负荷水平, 而与本节点接入负荷关系不大。

而节点 33 电压下降变化趋势与充电负荷变化趋势一致, 接入充电负荷增加时, 节点电压下降随之增加。由于节点 33 为受端节点, 其电压偏差为负, 变化趋势与电压下降的变化趋势相反, 充电负荷电



(a) 节点2电压



(b) 节点33电压

图3 充电负荷随机分布时节点电压—30%渗透率

Fig. 3 Node voltage for 30% random charging load

负荷 30%渗透水平下，电压偏差在-10%波动，最大偏差值为 0.102，电压出现越限，是否越限与充电负荷的分布有关。可见，一定的充电负荷水平，节点电压水平与充电负荷的接入位置密切相关。

对于特定的链式结构电力网络，节点电压水平理论上与线路传输的潮流和负荷分布有关，负荷总量及分布变化不大时，电压偏差分布总体上还是与节点位置有关，但随着电动汽车渗透率的提高，充电负荷的随机分布导致各节点总的负荷分布出现较大变化，因而电压偏差的分布因充电负荷分布的不同而有所不同。如考虑更多的随机分布情况，对个体样本，可能会在不同的位置出现不同的极值。

2.2 充电负荷局部集中分布

前面关于充电负荷随机分布的分析中，节点接入的充电负荷设置了上限，考虑到用户行为特性的分布，充电负荷可能在某些位置集中分布，例如住宅区、办公区或商业区等。

因此，这里考虑充电负荷 30%渗透水平下，其中 50%的充电负荷集中接入给定节点，另外 50%的充电负荷在其他节点平均分布。基于前面的分析，根据节点在网络结构中的位置不同，选取充电负荷在根节点、中间节点和末节点集中接入时，对测试网络的电压分布进行分析。

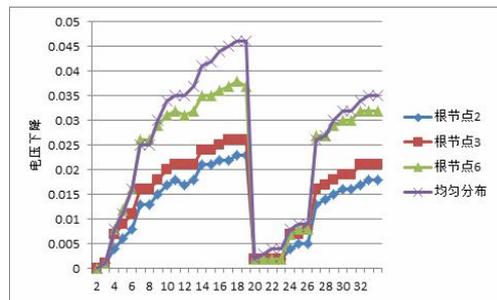
图 4 (a) 为充电负荷在根节点 2、3、6 集中分布时，各节点电压下降。由图可见，与充电负荷均匀分布相比，充电负荷集中接入靠近电源的根节点

时，各节点电压水平有所提高；而电压偏差值下降，电压质量有所改善，满足电压偏差的相关要求。

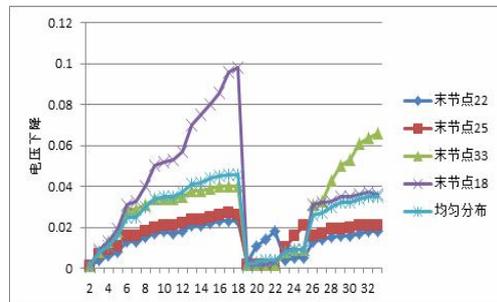
图 4 (b) 为充电负荷在末节点 22、25、33 和 18 集中分布时，各节点电压下降。

由于各末节点与供电点的电气距离不同，充电负荷集中接入时，网络各节点的电压质量变化趋势并不相同。与充电负荷均匀分布相比，充电负荷集中接入末节点 22、25 和 33 时，其各自所在的支路节点电压下降，而其他节点的电压则提高；充电负荷集中接入末节点 18 时，不仅支路 1 包含各节点电压下降，支路上与供电点距离较远的分支支路 2 的各节点电压也下降。由于充电负荷有功潮流传输距离较长，充电负荷集中接入支路 1 的末节点 18 和支路 2 的末节点 33 时，电压偏差值增加，负荷接入点及相邻节点的电压偏差值超过 10%。

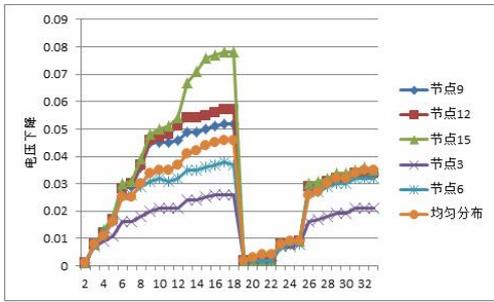
为分析同一线路上不同接纳充电负荷的能力，选取支路 1 的中间节点 9、12、15 为负荷接入点，分析各节点的电压变化，结果如图 4 (c) 所示。同一线路上，充电负荷接入点越靠近线路末端，电压下降越大，接入能力越差，对所选负荷集中接入点，线路末端均出现电压越限，接入点越靠近线路末端，发生电压越限的节点越多。与充电负荷均匀分布相比，支路 1 各节点的电压受影响最大，接入点之前的分支所包含的节点电压受影响很小。充电负荷集中接入线路分支点时，分支点之后的节点电压质量得到改善。



(a) 充电负荷在根节点集中分布电压下降



(b) 充电负荷在末节点集中分布电压下降



(c) 充电负荷在中间节点集中分布电压下降

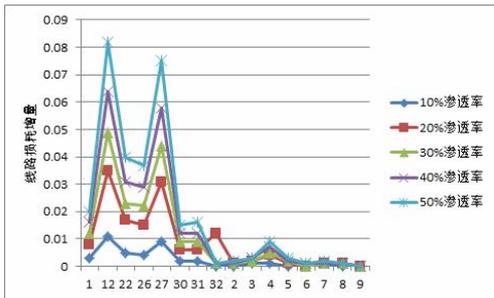
图 4 充电负荷局部集中分布电压下降

Fig. 4 Node voltage drop for charging load local concentration

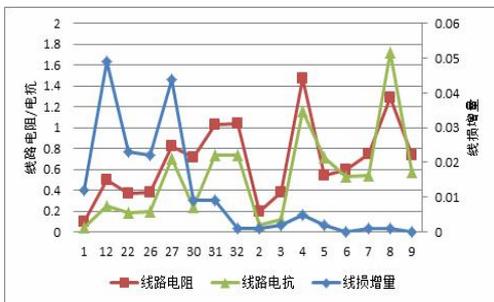
3 线损分析

同样, 电动汽车充电负荷渗透率越高, 给定网络的有功损耗增量越大。为更直观的反映线路有功损耗增量与线路所在位置的关系, 假设充电负荷均匀分布, 以支路1为例, 支路上各线路有功损耗分布显示如图5 (a) 所示。横坐标为支路编号。

由于新增的有功潮流由供端延配电网路向负荷端传输, 在同一渗透率水平下, 同一支路上靠近根节点的线路损耗增量最大, 随着充电负荷沿线递减, 距供电点越远的线路, 有功损耗增量越小。对于支路1, 由于其分支支路4所含节点较多, 分流的有功潮流占比也多, 分支点6前的线路27、26和22的线损增量随充电负荷变化明显。其中分支点3和分支点6



(a) 支路1线损增量



(b) 支路1线损增量与电阻/电抗的关系

图 5 支路1线损增量

Fig. 5 Power loss increment of branch 1

之间的线路27, 及分支6之后的线路4由于阻抗参数较大, 有功损耗增量也更明显, 甚至超过潮流传输的上级线路。而线路8虽然阻抗参数也较大, 但因靠近支路末端, 有功损耗增量与上级线路基本持平。线路损耗增量与线路电阻的关系如图5 (b) 所示。

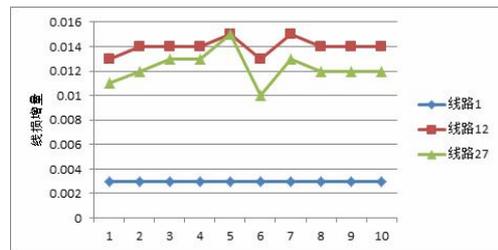
由图可见, 线路有功损耗的增加不仅与线路在潮流传输路径上的位置有关, 还与线路本身的阻抗参数有关。由充电负荷产生的线路潮流一定时, 线路电阻越大, 有功损耗增量越大。总的来说, 充电负荷均匀分布时, 由于有功潮流沿线递减, 越靠近供电点的线路其有功损耗增量越大。

3.1 充电负荷随机分布

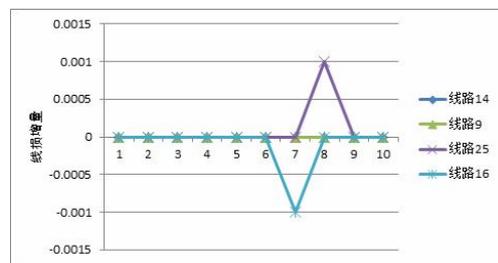
充电负荷在根节点之外的其他节点随机分布, 各节点充电负荷上限为均匀分布下节点充电负荷的150%。获得各线路的有功损耗分布。

结果显示, 充电负荷渗透率相同时, 充电负荷在各节点分布不同, 整个网络的有功损耗也不相同, 运行经济性因而不同, 对于参与仿真分析的随机分布样本, 总网络损耗最大值是最小值的1.57倍。

图6 (a) 显示了分支点前线路的有功损耗增量与充电负荷分布的关系。线路1由供电点直接引出, 是网络潮流的必经路段, 网络的总的负荷水平一定时, 充电负荷分布不同, 其线损有功损耗几乎不变。线路12和线路27的有功损耗增量随充电负荷分布不同波动明显。线路12之前分流的负荷节点较少, 线损变化略低。充电负荷10%渗透率时, 线路27线损增量最大值和最小值相差1.5倍。



(a) 随机分布下分支点前线路有功损耗增量



(b) 随机分布下末端线路有功损耗增量

图 6 随机分布下线路有功损耗增量

Fig. 6 Power loss increment for random distribution

由于末端线路只传输末节点的负荷潮流，线损增量主要受末节点接入的充电负荷的影响，因而随充电负荷分布变化不大，如图6 (b) 所示。10%渗透率时，由于末节点接入的充电负荷占比很小，线损几乎没有变化。

充电负荷随机分布时，给定网络各线路的线损增量和接入负荷的关系如图7所示。线路损耗分布理论上与线路传输的潮流和负荷分布有关，负荷总量及分布变化不大时，线损增量的分布总体上还是与线路位置和线路的阻抗参数有关。但随着电动汽车渗透率的提高，充电负荷的随机分布导致各线路的潮流分布出现较大变化，因而线损增量的分布因充电负荷分布的不同而有所不同。

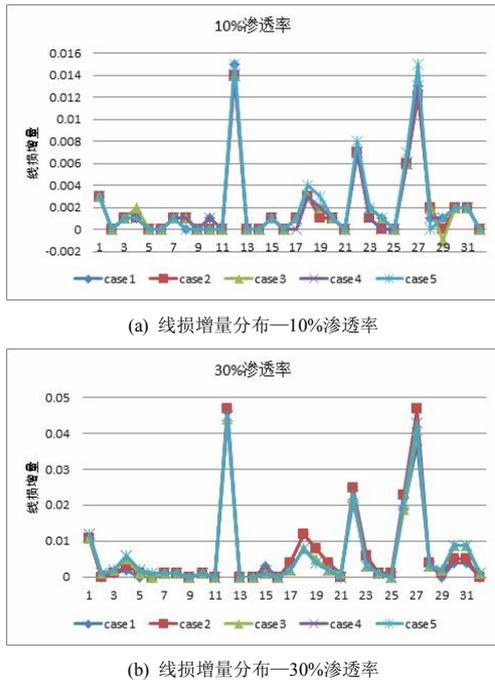


图 7 充电负荷随机分布下线损增量分布

Fig. 7 Power loss increment for random charging load

线路损耗增量主要与线路的下级线路及其分支各节点接入的充电负荷总量有关，也受本线路接入的充电负荷的影响。以线路18为例，其首末节点分别为节点27和28，图8显示了充电负荷30%渗透率时线损增量与下级线路及本线路所接入充电负荷总量的关系，线损增量与总负荷变化趋势基本吻合，当本线路末端充电负荷较大时，略有偏差。

在所考察的 10%、30%和 50%充电负荷渗透率水平下，线损增量均受充电负荷分布影响，随着分布不同呈现出波动。在实际运行中，不同线路负载率会不同，假定设计裕量相同，不同线路的供电可靠性有所不同，需要在充电站点规划时予以考虑。

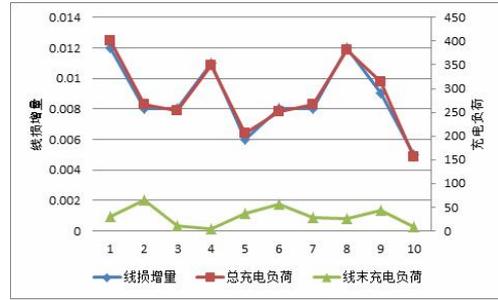


图 8 线路损耗增量与接入总充电负荷关系

Fig. 8 Power loss increment and total charging load

3.2 充电负荷局部集中分布

与电压分析一样，在充电负荷30%渗透率水平下，假设其中50%的充电负荷集中接入网络中某些节点。不同集中接入点时，给定网络总的损耗如图9所示。横坐标为负荷集中接入节点。

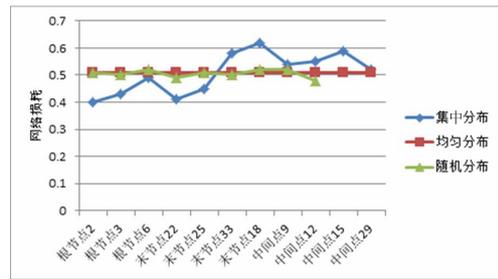


图 9 不同集中接入点下的网络损耗增量

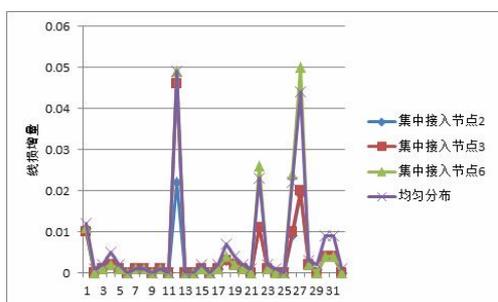
Fig. 9 Power loss increment for charging load concentration

由图可见，充电负荷集中接入的位置不同，网络总的有功损耗不同。与充电负荷均匀分布相比，充电负荷在节点2、3、6、22、25集中接入时，网络总损耗下降，且低于参与分析的大多数随机分布。充电负荷的传输的电气距离越短，网络损耗越小。

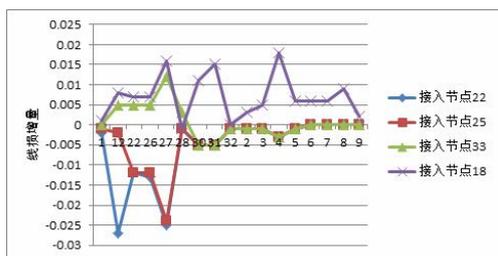
为进一步分析各线路有功损耗的分布，将不同充电负荷分布情况下，各线路的有功损耗增量显示如图10。

图10 (a) 为充电负荷在根节点2、3、6集中分布时，各线路的线损增量。由图可见，充电负荷集中接入靠近供电点的根节点时，接入点之后的线路和接入之前分支的线路的有功损耗都下降。

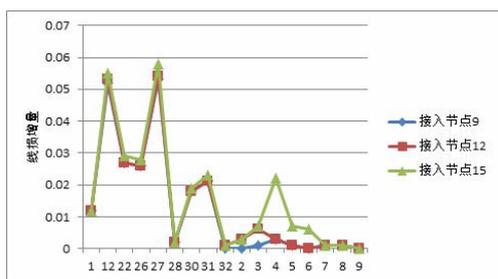
图10 (b) 为充电负荷在各支路末节点22、25、33和18集中分布时，支路1上各线路的有功损耗增量分布。当充电负荷接于支路的末端时，本支路所包含的各线路的有功损耗明显增加。充电负荷接于其他支路末端时，分支点后线路有功损耗增量低于平均分布，位于潮流传输主干路径上的线路变化最为明显。



(a) 充电负荷在根节点集中分布



(b) 充电负荷在末节点集中分布



(c) 充电负荷在中间节点集中分布

图 10 充电负荷集中分布线损增量

Fig. 10 Power loss increment for charging load local concentration

选取支路1的节点9、12、15为负荷接入点, 线损增量如图10(c)所示。充电负荷接入点之前的线路有功损耗增量变化很小, 接入点之后的线路有功损耗增量下降明显。

由计算结果可以看出, 对于链式配电网, 电动汽车充电负荷集中接于根节点的网络损耗最小, 随着接入点由根节点向末节点移动, 网络损耗增加, 接入末节点网络损耗最大。因为满足电动汽车充电需求的有功功率传输范围不同, 功率传输的路径越长, 电气距离越长, 有功损耗也越大。在给定电压等级下, 线路电流随之增大, 负载率增加。因此, 考虑运行经济性和线路运行可靠性因素, 电动汽车充电站规划尽可能靠近配电线路根节点。

4 结论

基于上述分析, 在电动汽车充电站规划设计

和运行管理应从下面几个方面考虑, 与配电网运行相协调, 以减少规模化电动汽车充电负荷接入配电网带来的不良影响。

1) 电动汽车充电站的选址和定容不仅需要考虑电动汽车充电负荷的分布, 还需要结合配电网的拓扑结构和设备参数, 合理设置充电站, 并依据线路和变压器容量设计充电站充电能力。

2) 对于靠近电源的供端节点, 电压水平受充电负荷影响较小, 是充电站设置的理想选择。实际规划设计时, 还要考虑电动汽车停靠场所和线路走廊等客观条件。

3) 对于相对薄弱的受端节点, 电动汽车充电负荷比率较高时, 原则上不配置充电站, 充电负荷比率不太高时, 若限于客观条件, 薄弱点配置充电站时, 结合无功补偿, 应该通过站点定容和充电负荷引导避免电压越限。

4) 电动汽车充电站的运行管理中, 根据配电网运行约束条件和电动汽车的实际充电需求, 设置合理的优化目标, 采取合适的经济技术措施引导电动汽车充电负荷有序分布。通过充电负荷的合理调度, 实现电动汽车充电负荷曲线重构, 使得不同时段不同网点的负荷保持期望水平, 能够提高配电网运行的经济性和可靠性。

5) 远期来看, 根据电动汽车产业化进程, 电动汽车充电负荷的准确预测, 对包含电动汽车充电负荷的配电网的升级改造, 规划设计、设备选型、和运行管理具有重要意义。

参考文献

- [1] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 22-27.
YANG Bing, WANG Li-fang, LIAO Cheng-lin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacts factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27.
- [2] HADLEY S W. Impact of plug-in vehicle on electric grid. ORNL/TM-2006/554[M]. Pacific Northwest National Laboratory, 2006.
- [3] CLEMENT-NYNS K, HAESSEN E, DRIESEN J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 371-380.
- [4] HADLEY S W, TSVETKOVA A. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation[M]. 2008.

[5] DENIGRIS M, GIANINONI I, MAURI G, et al. Plug-in electric vehicles and their impact on the electrical system: the Italian R & D experience[C] // The 25th International Electric Vehicle Symposium (EVS-25), Shenzhen, China, 5-9 November, 2010.

[6] 张仁贡, 王培萍, 黄润长. 电力系统短期负荷优化分配系统的设计与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 86-91.
ZHANG Ren-gong, WANG Pei-ping, HUANG Run-chang. Design and study on the short-term load optimizing distribution of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 86-91.

[7] 周莹, 白雪峰, 郭志忠, 等. 动态划分负荷的多目标日发电计划[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 44-48.
ZHOU Ying, BAI Xue-feng, GUO Zhi-zhong, et al. Multiobjective daily generation scheduling method with dynamic partitioning load[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 44-48.

[8] 葛文婕, 黄梅, 张维戈. 电动汽车充电站经济运行分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 15-21.
GE Wen-jie, HUANG Mei, ZHANG Wei-ge. Economic operation analysis of the electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 15-21.

[9] 张明霞, 田立亭. 一种基于需求分析的电动汽车有序充电实施架构[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 34(11): 126-130.
ZHANG Ming-xia, TIAN Li-ting. A method to organize the charging of electric vehicle based on demand analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 34(11): 126-130.

[10] GAO Shuang, CHAU K T, CHAN C C, et al. Modeling, evaluation and optimization of vehicle-to-grid operation[C] // The 25th International Electric Vehicle Symposium (EVS-25), Shenzhen, China, 5-9 November, 2010.

[11] 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 Li-ting, SHI Shuang-long, JIA Zhuo. A statistical model for charging power demand of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 126-130.

[12] 田文奇, 和敬涵, 姜久春, 等. 电动汽车充电负荷空间分配优化算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 269-276.
TIAN Wen-qi, HE Jing-han, JIANG Jiu-chun, et al. Electric vehicle charging load spatial allocation optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 269-276.

收稿日期: 2014-01-02; 修回日期: 2014-07-21

作者简介:

张明霞(1980-), 女, 博士, 研究方向为智能电网、电工新技术。E-mail: zhangmingxia@epri.sgcc.com.cn