

电气化交通对电网影响的多维度评估模型与优化策略

董佳莹

(国网山西省电力公司夏县供电公司)

【摘要】全球可再生能源关注度持续提升,电气化交通随之快速发展。然而,其接入大型电网会带来显著负荷冲击,对电力系统的运营调度与规划设计构成挑战,影响电网持续稳定运行。为此,文章从电压稳定、负荷分配、电能质量三个维度出发,系统构建多维评价模型,研究交通电气化对电网的复杂影响机制,并提出针对性优化策略。旨在为电网安全、稳定、高效运行提供重要理论与技术支撑,促进交通电气化与电力系统协调发展,助力全球能源转型与可持续发展。

【关键词】电气化交通;电网;多维度评估模型;影响;优化策略

中图分类号:TM73;U491

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.134

Multi-dimensional Evaluation Model and Optimization Strategy of the Impact of Electrified Transportation on the Power Grid

DONG Jia-ying

(State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd. Xiaxian Power Supply Company)

【Abstract】With the growing global focus on renewable energy, electrified transportation has also developed rapidly. However, its integration into large-scale power grids imposes significant load impacts, posing challenges to the operation and dispatching as well as planning and design of power systems and affecting the continuous and stable operation of power grids. To address this, this paper establishes a multi-dimensional evaluation model from three perspectives: voltage stability, load distribution, and power quality, studies the complex impact mechanism of transportation electrification on power grids, and proposes targeted optimization strategies. It aims to provide important theoretical and technical support for the safe, stable, and efficient operation of power grids, promote the coordinated development of electrified transportation and power systems, and contribute to the global energy transition and sustainable development.

【Keywords】electrified transportation; power grid; multi-dimensional evaluation model; impact; optimization strategy

1 引言

电气化交通行为具有随机性、集中性特点,其大规模接入会影响电网电压稳定、负载分布和电能质量,不仅增加电网负荷,还严重影响电力系统可靠性和能源效率^[1]。因此,构建科学的多维评价模型,研究电气化交通对电网的影响,提出切实可行的优化方案,是确保电网安全稳定运行、提高能源利用率、推动电气化交通和电力系统协调发展的重要手段。

2 电气化交通发展现状

我国依托政策扶持与技术创新驱动电动汽车产业持续发展,欧洲多国加速充电基础设施布局以提升电动交通渗透率^[2],美国则聚焦技术升级与生产规模拓展推进电动交通产业发展,多国还出台专项政策激励制造商研发电动汽车、引导消费者购买。

与此同时,电池技术、充电技术持续创新且与智能技术深度融合,进一步提升电动交通的便利性与吸引力,推动交通运输领域迈向更清洁、更高效的阶段。

电气化交通的主要形式有电动汽车、电动公交车、电动摩托车、电动卡车、电动物流车辆等,目前深圳已实现公交车辆100%电动化,截至2022年全球电动汽车销量已超5000万辆,特斯拉Semi与BYD T5相继上市更标志着电动卡车正式进入市场^[3]。

环境保护、能源结构调整与经济效益提升是推动电气化交通发展的主要动力:与传统燃料车相比,其全生命碳排放量减少50%~70%,与风能、太阳能相结合可提高能源效率,且运行成本更低,电费仅为燃料费用的1/3~1/2,加之电池回收产业链日趋完善,能有效降低全生命周期的费用^[4]。

3 多维度评估模型构建

3.1 电压稳定性指标

3.1.1 指标的选择

基于节点电压偏移量的新方法,节点电压偏差由下式计算:

$$\Delta V_i = \frac{V_{i, \text{no min al}} - V_{i, \text{actual}}}{V_{i, \text{no min al}}} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: ΔV_i 表示节点*i*的电压偏移率, $V_{i, \text{no min al}}$ 表示节点*i*的额定电压值, $V_{i, \text{actual}}$ 表示节点*i*的实际电压值。该指标可直观反映连接电网后电网中各节点电压水平变化的情况,若出现较大变化,电网设备将无法正常工作。

3.2 负载的分布维度

3.2.1 指标的选择

采用负载不平衡的测量方法,负载不平衡程度的计算公式如下:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n}} \quad (2)$$

式(2)中: λ 表示负载不平衡程度, P_i 表示第*i*个周期的负载, $\bar{p}$ 表示平均负载, n 表示整个周期的数量,负载分配的不均匀性导致部分线路和设备过载。

3.2.2 模型建设

要研究电动汽车充电负载对电网负载分配的影响,需按区域和时间段对充电行为进行仿真,以获得区域和时间段内的负载不平衡。

①研究用户充电行为特征:用户充电行为与使用习惯密切相关。通过调查与大数据分析,掌握商业区、居民区、办公区等区域电动汽车行驶规则及续航里程偏好,为电动汽车充电行为提供科学依据。

②充电负载建模:基于概率分布,对充电时间和功率的随机特性进行建模。在此基础上,将充电时间设定为常时或对数常时,根据充电需求类型及车载电池状况设定充电量。该模型可模拟各区域一天中不同时间点的充电负载分布。

③负载不平衡计算:将各区域充电负载与电网相应节点叠加,根据不平衡度公式计算负载平衡值。

④电力系统影响评价和规划建议:通过分析电力系统不平衡状况,评价其对电力系统负荷分配的影响,为制定电力系统规划方案提供依据。

3.3 电能质量指标

3.3.1 指标的选择

基于谐波失真率的电能质量评价方法,通过以下公式计算当前谐波失真率:

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中: THD_I 为电流谐波失真率, I_h 为*h*次谐波有效电流, I_1 为基本电流有效值。谐波失真率会引起电气设备发热、振动,进而影响设备使用寿命与电网安全运行。

3.3.2 模型建设

考虑电气化交通负载特性及电力电子设备谐波产生机制构建电能质量分析模型。结合电力系统瞬态模拟软件PSCAD/EMTDC,构建包括电气化交通的电力系统网络模型。模拟电动汽车充电用整流器装置在电网中产生的大量谐波。通过仿真电力系统中各节点的电压、电流波形,提取各节点谐波成分,计算出各节点的谐波失真率。同时针对电压闪变问题,提出电力系统动态模拟方法,可根据电网实际情况计算相应Pst值。此外,采用谐波潮流计法研究电力系统各节点的谐波传输特性及其对电能质量的影响,为制定电力系统最佳控制方案提供理论依据。

4 电气化交通对电网的影响分析

4.1 电压稳定性影响

随着电气化交通的普及,大量电动汽车与电动铁路投入运营,对电网电压稳定性产生重要影响。大量电动汽车集中充电时,电网局部负荷急剧增加。依据电网电压特性,电流增大将导致电网电压跌落,尤其会使旧式住宅终端用户电压急剧下降,进而影响电气设备正常运行。电动铁路采用单相工频交流供电方式,导致电网三相负载严重不平衡,造成接入点附近三相电压不平衡跌落,且会对发电机组等设备产生负序电流,危及电网电压稳定,严重时可能引发电压崩溃,导致大面积停电。

4.2 负荷分配效应

电气化交通改变了电网负载分配。过去,电力系统负荷集中在工业区域和家庭用电量高峰时段。电动汽车充电负荷具随机性和时间性,尤其在时空分布上,上班族晚间充电与家庭用电高峰重叠、白天

商业区和办公区附近公共充电站需求旺盛,均导致负荷分配变化。电力铁路负荷沿线分布,牵引变电站以负荷为中心,其负荷与列车运行方案密切相关。其特点使电力系统的负荷预测和调度难度增加,若规划不合理将影响全电网运行效率。

4.3 电能质量的影响

在电气化交通运行过程中,相关电力电子设备对电能质量影响显著。电动汽车充电器基于电力电子变流技术实现整流与逆变,充电过程中会产生大量谐波,导致电网电压波形畸变。在充电站密集区域,电网谐波电压总畸变率超国家标准限值4%(10kV及以下),严重威胁变压器、用电设备等的安全运行^[5]。

电气化铁路牵引系统运行时,其牵引功率中存在大量谐波且伴随三相不对称问题。其中,负序电流不仅会增加发电机转子损耗、加剧其振动,还会干扰继电保护设备正常动作,威胁电网安全稳定运行。

5 基于多维度评估模型的优化策略

5.1 充电政策优化

5.1.1 充电智能化控制

根据电网电压和负荷等进行自适应控制,当电力系统负载达峰值时减少汽车充电量;在电力需求低时提高电池充电能力。使用以下优化目标函数:

$$\min \sum_{t=1}^T \lambda(t) + \sum_{i=1}^N \Delta V_i(t) + \sum_{h=2}^{\infty} THD_{i,h}(t) \quad (4)$$

式(4)中: $\lambda(t)$ 为系统负荷代价,即时刻 t 的电网运行压力或成本函数; $\Delta V_i(t)$ 为节点电压偏移量,即第 i 个节点在时刻 t 的电压偏差。 $THD_{i,h}(t)$ 表示第 h 次谐波在时刻 t 的电流谐波失真率。约束条件包括电网的功率平衡约束、电压约束、电流约束等。

5.1.2 充电计划的排序

利用大数据分析分析方法分析电动汽车的充电行为,制订适当的充电计划。

5.2 电网改善

5.2.1 增加电力系统的容量

根据新能源汽车发展的要求,适当增加变电站容量,加强输电线路,增加电网容量。

5.2.2 安装无功补偿设备

通过安装静态无功发电机(SVG)等无功补偿设备来调整电网无功并稳定电压,解决电网电压波动。

5.3 分布式能源供应

5.3.1 光伏电站

在电动汽车充电站安装太阳能设备,减少电网负荷及对电网的依赖。太阳能电池的能量与光的强度和温度等有关,其功率输出模型为:

$$P_{pv} = P_{p,STC} \frac{G}{G_{STC}} [1 + \alpha(T_c - T_{c,STC})] \quad (5)$$

式(5)中: P_{pv} 为太阳能电池实际输出功率, $P_{p,STC}$ 为标准试验状态(STC)下太阳能电池的额定输出功率, G 是实际光强, G_{STC} 是标准光强, α 为太阳能电池功率温度系数, T_c 是电池面板的温度, $T_{c,STC}$ 为标准试验状态下电池面板的基准温度。

5.3.2 储能技术的应用

通过安装储能装置,如蓄电池,在电网负荷低时存储,在峰值时释放,以达到“削峰填谷”的目的。

6 结语

综上,本文从电压稳定、负荷分配、供电质量等方面综合考虑电气化交通对电力系统的影响,并以此构建多维评价模型;提出最佳充电策略、电网升级、分布式电源接入等策略,有助于减少对电网的不利影响,促进电力系统及能源可持续发展。

参考文献

- [1] 李俊豪,涂春鸣,王鑫,等.基于“规则+优化”的电气化铁路站点实时能量管控策略[J].电工技术学报,2024,39(11):3339-3352.
- [2] 杨毅,李泽.基于问题分类分级农村配电网项目精准投资策略研究[J].农村电气化,2024(1):14-17.
- [3] 李明琪.城市配电网集群充电负荷协调优化与调度策略研究[D].广东:华南理工大学,2021.
- [4] 周萌,于龙,王子龙.“双碳”目标下电气化铁路源网车储关键技术研究[J].电力电子技术,2024,58(7):80-85.
- [5] 江昊,黄诗岩,张庚.信息网-电网-交通网模型构建与故障传播研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(9):15-23.