

电动汽车充电机运行状态多指标综合评估

杨月新¹, 车延博¹, 杨立勋²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 天津天高感应加热有限公司, 天津 300384)

摘要:随着电动汽车的大规模应用,充换电设施在运行过程中的插拔接口接触不良、输出指标误差过大或安全性能测试不合格都将影响其使用性能。针对此问题,提出充电机运行状态多指标综合评估方法。在分析现有标准的基础上,提出各项指标模糊理论评分方法,构建了充电机运行状态评估指标体系;基于大量投用的充电机对电网稳定性、电池寿命及其自身安全可靠性的影响,确定各项评估指标重要度,采用层次分析法及熵权修正法确定各项评估指标的权重值,建立综合权重矩阵。实例分析结果表明,采用充电机运行状态多指标综合评估方法得到的结果直观且与实际相符,具有较高的可靠性。

关键词:电动汽车;充电机;熵权法;层次分析法;状态评估

中图分类号:U 469.72

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.010

0 引言

随着能源及环境问题的日益突出,采用新型的能源交通方式十分必要。电动汽车作为一种绿色能源消费方式,其可充分利用电能,势必将取代燃油汽车成为新时代的交通工具。充换电设施的配套建设与电动汽车的规模化发展相辅相成又相互制约。充换电设施具有城市公共服务设施及普通用电设施的双重属性,其安全运营会为电网的稳定可靠性及充电服务质量提供有力保障^[1-8]。

充换电设施作为大功率负荷,其运行状态不仅会对自身可靠性^[5,9-10]及动力电池使用寿命^[11]产生影响,同时会影响配电网的承载能力及配电变压器寿命^[14,12-13]。目前,国内外针对充换电设施的研究多集中于对配电网的影响分析^[1-3,6,14-19]、充电站监控系统设计^[4]、电气性能检测^[5,9]、优化配置^[15]等方面。文献[1]从热负荷、电压调节、系统稳定性及失载率四方面分析了用电负荷插电式电动汽车(PHEV)对分布式系统的影响。文献[2]在协调PHEV充电方面探讨了馈线损失、加载因子与负荷变化之间的关系,并提出了最小化PHEV充电对分布式系统影响的3个最优充电算法。电动汽车具有负荷及储能的双重功能属性,通过改善充换电设施运维,可减少其对电网的不利影响,从而优化电网的运行^[3]。

充换电设施运维体系的完善亟需配套的状态评估技术,以保障充换电设施运行的安全性,切实提高系统可靠性。文献[10]采用平均小信号模型分析影响充电机控制环路特性的因素,对充电机稳定性

进行研究,但缺乏工程实用性。目前国内产品质量监督检验等单位主要针对充电机进行安全风险预估,未充分考虑充电机电气性能的检测。大规模充电机在运行过程中产生的插拔接口接触不良、输出指标误差过大、安全性能测试不合格等问题将产生恶劣影响,同时,电动汽车市场尚不完善,各国标准及产品型号缺乏统一,增加了充电机运行状态评估的复杂性与难度。

设备电气性能通常分为输出性能、保护性能、安全性能、电磁兼容性能、可靠性和附加性能6个部分^[7,9]。因需求的不同,通常针对输出性能^[5,11]、安全性能^[5]等部分指标进行测试。为满足快速、高效的运维检测要求,本文将选取输出性能等关键指标对充电机运行状态进行评估。层次分析法(AHP)是一种多属性、多层次的决策方法,但是AHP主观性较强,需要结合其他方法改进以实现综合评估。熵权法是一种客观赋权法,其根据评估指标中有效信息量确定各指标权重^[6]。AHP和熵权法综合的决策评估方法在有序用电优化、配电网承载能力等可靠性评估优化中得到了广泛应用^[6,8,14],将该综合评估方法应用于充电机运行状态评估中,可使得评估结果更加可靠。计及多种影响因素的充电机运行状态评估方法研究,有利于形成完善的充换电设施运维体系,为电动汽车的顺利推广提供保障。

本文首先在分析充电机检测标准及运维数据的基础上,提出各项指标模糊理论评分方法,构建充电机运行状态评估指标体系。然后,计及充换电设施对电网、电池寿命以及自身可靠性三方面产生的影响,采用基于AHP和熵权修正法的综合权重计算方法,提出综合权重矩阵,同时结合提出的评估指标体系,形成充电机运行状态多指标综合评估

收稿日期:2017-01-17; **修回日期:**2017-10-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0900204)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900204)

方法。最后,对额定容量为 10 kW 的充电机模块进行算例分析和测试验证,证明了本文所提评估方案的可靠性。

1 评估指标体系

1.1 评估指标

根据电动汽车充电机性能影响分析及充电机检测标准 NBT-33001^[7],从一般性能(常规外观检查)、安全性能(为满足充电机安全要求所必须的性能)和输出性能(为满足充电机输出要求所必须的性能)三方面共选取 15 个密切相关的评估指标,部分指标要求如下。

a. 效率和功率因数。设定被测充电机输出电压为额定值,调整输出电流在额定值的 50%~100% 范围内时,或者设定输出电流为额定值,调整输出电压在额定值的 50%~100% 范围内时,充电机的功率因数应大于等于 0.9,效率应大于等于 90%。效率的计算公式如下:

$$\eta = \frac{P_z}{P_j} \times 100\% \quad (1)$$

其中, η 为效率; P_z 为直流输出有功功率; P_j 为交流输入有功功率。

b. 输出电流误差。在恒流状态下,被测充电机输出直流电流设定在额定值的 20%~100% 范围内,当设定的输出直流电流大于等于 30 A 时,输出电流整定误差不应超过 $\pm 1\%$;当设定的输出直流电流小于 30 A 时,输出电流整定误差不应超过 ± 0.3 A。电流整定误差的计算公式如下:

$$\Delta I = \frac{I_z - I_{z0}}{I_{z0}} \times 100\% \quad (2)$$

其中, ΔI 为电流整定误差; I_z 为交流输入电压为额定值且充电电压为调整范围内的中间值时充电电流测量值; I_{z0} 为充电电流设定值。

c. 纹波系数。被测充电机在一定工况下运行时,其输出纹波有效值系数不应超过 $\pm 0.5\%$,纹波峰值系数不应超过 $\pm 1\%$ 。纹波有效值系数和峰值系数计算公式分别如下:

$$X_{\text{rms}} = \frac{U_{\text{rms}}}{U_{\text{DC}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$X_{\text{pp}} = \frac{U_{\text{pp}}}{U_{\text{DC}}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, X_{rms} 为纹波有效值系数; X_{pp} 为纹波峰值系数; U_{rms} 为输出电压交流分量有效值; U_{pp} 为输出电压交流分量峰值; U_{DC} 为直流输出电压平均值。

将充电机运行状态记为 Y ,一般性能记为 A ,安全性能记为 B ,输出性能记为 C 。充电机运行状态评估体系如图 1 所示。图中各个符号代表的指标见

表 1。

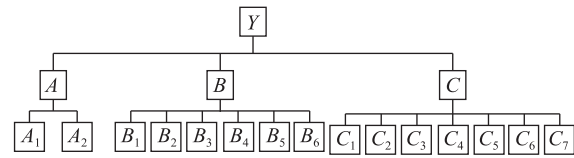


图 1 评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system

表 1 评估指标对应符号说明

Table 1 Instruction of corresponding symbols for evaluation indexes

符号	指标	符号	指标
A_1	一般外观性能	C_1	限压功能
A_2	IP 防护等级	C_2	限流功能
B_1	软启动性能	C_3	输出电压误差
B_2	输入过压保护性能	C_4	输出电流误差
B_3	输入欠压保护性能	C_5	稳流精度
B_4	效率和功率因数	C_6	稳压精度
B_5	输入谐波电流	C_7	纹波系数
B_6	输出短路保护性能		

1.2 模糊理论评分

模糊理论^[6]以评语集和隶属度函数为基础,其依据故障因素及计算函数存在的某种模糊关系进行隶属度划分,广泛应用于工程评估。

a. 评语集的确定。充电机运行状态评估指标的评语集为优、良、差 3 个等级。其中优表示检测合格,良表示被检测指标处于临界状态,差表示检测不合格。

b. 隶属度函数的确定。根据 15 个充电机运行状态评估指标的定义,将 B_5 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 归为成本型指标(越小越好),将 A_1 、 A_2 、 B_4 、 B_6 归为效益型指标(越大越好),将 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 C_2 归为中间型指标(处于某个区间内最好)。

以成本型指标为例,根据充电机检测数据,基于模糊理论分析法^[6]确定成本型指标隶属度函数的最优与最差值分别为 n'_1 、 n'_3 ,并且取两者中间值为 n'_2 ($n'_1 < n'_2 < n'_3$)。则成本型指标的隶属函数为:

$$\mu'_i = \begin{cases} 1 & n_i \leq n'_1 \\ \frac{n_i - n'_2}{n'_1 - n'_2} & n'_1 < n_i < n'_2 \\ 0 & n_i \geq n'_2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_i^2 = \begin{cases} \frac{n_i - n'_2}{n'_1 - n'_2} & n'_1 < n_i < n'_2 \\ \frac{n_i - n'_3}{n'_2 - n'_3} & n'_2 \leq n_i < n'_3 \\ 0 & n_i \geq n'_3, n_i \leq n'_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_i^3 = \begin{cases} 0 & n_i \leq n'_2 \\ \frac{n_i - n'_2}{n'_3 - n'_2} & n'_2 < n_i < n'_3 \\ 1 & n_i \geq n'_3 \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ_i^k 表示成本型指标 i 的评语为 k 的隶属度, $k=1,2,3$ 分别表示评语集优、良、差 3 个等级, $i=1,2,\dots,6$ 分别表示 $B_5, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ 6 项评估指标。

效益型指标与成本型指标的隶属度函数计算方法类似,取指标的最优与最差值分别为 n''_1, n''_3 , 并取两者中间值为 $n''_2 (n''_3 < n''_2 < n''_1)$ 进行隶属度函数计算,不再赘述。

根据充电机检测标准,确定中间型指标的隶属度函数的临界区间的上、下限分别为 n_6, n_1 , 最优区间的上、下限分别为 n_4, n_3 , 取临界区间下(上)限值与最优区间下(上)限值的中间值为 $n_2 (n_5) (n_1 < n_2 < n_3 < n_4 < n_5 < n_6)$ 。则中间型指标的隶属函数为:

$$\mu_i^1 = \begin{cases} 1 & n_3 \leq n_i \leq n_4 \\ \frac{n_i - n_2}{n_3 - n_2} & n_2 \leq n_i < n_3 \\ \frac{n_i - n_5}{n_4 - n_5} & n_4 < n_i \leq n_5 \\ 0 & n_i < n_2, n_i > n_5 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_i^2 = \begin{cases} 0 & n_3 \leq n_i \leq n_4, n_i \leq n_1, n_i \geq n_6 \\ \frac{n_i - n_1}{n_2 - n_1} & n_1 < n_i < n_2 \\ \frac{n_i - n_3}{n_2 - n_3} & n_2 \leq n_i < n_3 \\ \frac{n_i - n_4}{n_5 - n_4} & n_4 < n_i < n_5 \\ \frac{n_i - n_6}{n_5 - n_6} & n_5 \leq n_i < n_6 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_i^3 = \begin{cases} 1 & n_i \leq n_1, n_i \geq n_6 \\ \frac{n_i - n_2}{n_1 - n_2} & n_1 < n_i \leq n_2 \\ \frac{n_i - n_5}{n_6 - n_5} & n_5 \leq n_i < n_6 \\ 0 & n_2 < n_i < n_5 \end{cases} \quad (10)$$

其中, μ_i^k 表示中间型指标 i 的评语为 k 的隶属度, $k=1,2,3$ 分别表示评语集优、良、差 3 个等级, $i=11,12,\dots,15$ 分别表示 B_1, B_2, B_3, C_1, C_2 5 项评估指标。

c. 计算各项指标评分矩阵。取优、良、差 3 个等级评语的评分 $D_k (k=1,2,3)$ 分别为 100、75 和 50,

则评估指标 i 的模糊评分 E_i 和评分矩阵 E 分别为:

$$E_i = \frac{D_k \mu_i^k}{\sum \mu_i^k} \quad (11)$$

$$E = [E_1 \ E_2 \ E_3 \ \dots \ E_{15}] \quad (12)$$

2 综合评估方法

充电机运行状态直接影响配电网、动力电池及其自身可靠性等性能。在充电机运行状态评估过程中,分析充电机各项评估指标对以上三方面的影响程度,采用主观与客观相结合的 AHP 和熵权法综合的决策评估方法进行权重计算,给充电机安全性能、输出性能等评估指标赋不同权重值,为综合性能评估奠定基础。

2.1 AHP

AHP 是美国运筹学家 T. L. Satty 于 1977 年提出的一种将定性定量相结合的多目标决策方法^[6]。AHP 首先将定量信息分为目标层、目的层和指标层,然后通过比率分析将设计者主观定性分析量化,对各指标进行权重计算。AHP 作为简便的评估方法,在状态评估中得到了广泛应用^[14]。采用 AHP 确定权重的步骤如下。

a. 构建层次结构。根据系统可靠性指标、影响因素和子系统可靠性之间的关系,构建多层次分析指标体系,如图 1 所示。图中, Y 为目标层, A, B, C 为目的层,其他为指标层。

b. 构造判断矩阵。根据指标层各指标之间的相对重要度确定判断矩阵。评估过程中,以充电机运行状态对配电网承载能力、动力电池以及其自身可靠性影响程度为衡量指标,结合充电机运维数据及相关领域专家意见,确定各项评估指标的重要度。基于配电网、电池及其自身可靠性被影响的轻重程度,记充电机运行状态对三者影响程度各占总影响的 G, H 和 $J (G+H+J=1)$ 。

2.1.1 对配电网承载能力的影响

随着电动汽车充换电设施的大规模应用,电网将产生超载的问题,降低电网效率,影响其电能质量特别是配电端电压调节^[2]。如果对充电负荷不加控制或政策引导,电动汽车的大规模应用将导致电网“峰上加峰”,造成电网电压畸变,影响配变、电缆和继电保护装置的使用寿命,这将给电网的安全稳定运行带来极大挑战^[15-23]。同时,配电网承载能力将受到严峻考验。

充电机运行状态会对电压水平合格率、无功配置、单回线路安全运行状态、短时负载率、网络和设备损耗、无功补偿耗费等传统配电网承载能力指

标产生影响。记充电桩的运行状态对配电网产生的总影响为1,则其对配电网承载能力各项指标影响程度之比为 $\alpha_1:\beta_1:\gamma_1:\delta_1:\varepsilon_1:\eta_1$ ($\alpha_1+\beta_1+\gamma_1+\delta_1+\varepsilon_1+\eta_1=1$)。假设配电网各项指标所对应的充电桩评估指标重要度相同,则各指标对应关系如表2所示。

表2 配电网承载能力指标及对应的充电桩评估指标

Table 2 Supportability index of distribution network and corresponding evaluation index of charger

配电网承载能力指标	充电桩评估指标	评估指标总重要度
电压水平合格率	C_1, C_3, C_6	$G\alpha_1$
无功配置	B_4, C_1-C_7	$G\beta_1$
单回线路安全运行状态	$A_1, A_2, B_2, B_4-B_6, C_1-C_7$	$G\gamma_1$
短时负载率	B_4	$G\delta_1$
网络和设备损耗	B_4, C_1-C_7	$G\varepsilon_1$
无功补偿耗费	B_4, C_1-C_7	$G\eta_1$

2.1.2 对动力电池的影响

电动汽车动力电池组一般由大量的单体串联组成,由于每个单体制造工艺的差别,存在内阻、电压、容量和温度的不一致性,易造成充放电过程中的不均衡,即大容量单体浅放、小容量单体过放,这会对电池组造成损伤^[11,21-23]。

充电桩输出性能及安全性能会对电池使用寿命产生严重影响。而电池作为充电过程中的主体,对其影响程度将作为评估充电桩性能的重要因素。以电池充电过程中的充电电压、电流、功率为电池充电指标。记充电桩的运行状态对电池产生的总影响为1,则其对各项充电指标影响程度之比为 $\alpha_2:\beta_2:\gamma_2$ ($\alpha_2+\beta_2+\gamma_2=1$)。假设各项充电指标所对应的充电桩评估指标重要度相同,则各指标对应关系如表3所示。

表3 充电指标及对应的充电桩评估指标

Table 3 Index of charging and corresponding evaluation index of charger

充电指标	充电桩评估指标	评估指标总重要度
充电电压	C_1, C_3, C_6, C_7	$H\alpha_2$
充电电流	C_2, C_4, C_5	$H\beta_2$
充电功率	B_1, B_4, B_5, B_6	$H\gamma_2$

2.1.3 对充电桩的影响

充电桩运行状态影响自身安全可靠。根据国家能源行业标准^[7]的要求,充电桩应具备输入过压、欠压及输出短路保护功能,限压、限流功能和输出过压、过流、过温等保护功能。且充电桩在运行过程中的设备发热、连接装置的插拔接口接触不良、输出指

标误差过大或安全性能测试不合格都会影响充电桩的使用性能,从而影响其输出电能质量。

记充电桩的运行状态对自身产生的总影响为1,则对其自身的一般性能、安全性能、输出性能的影响程度之比为 $\alpha_3:\beta_3:\gamma_3$ ($\alpha_3+\beta_3+\gamma_3=1$)。假设各项性能对应的充电桩评估指标重要度相同,则各指标对应关系如表4所示。

表4 充电桩运行状态及对应的评估指标

Table 4 Running state and corresponding evaluation index of charger

充电桩性能指标	充电桩评估指标	评估指标总重要度
一般性能	A_1, A_2	$J\alpha_3$
安全性能	B_1-B_6	$J\beta_3$
输出性能	C_1-C_7	$J\gamma_3$

$G, H, J, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \delta_1, \varepsilon_1, \eta_1, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \alpha_3, \beta_3$ 及 γ_3 的取值可根据不同型号充电桩的累积试验数据、专家意见及相关研究确定。根据表2—4中各项指标总重要度值,确定各项评估指标重要度如表5所示。

表5 充电桩运行状态的各项评估指标重要度

Table 5 Importance of running state evaluation indexes for charger

评估指标	重要度
A_1	$G\gamma_1/13+J\alpha_3/2$
A_2	$G\gamma_1/13+J\alpha_3/2$
B_1	$H\gamma_2/4+J\beta_3/6$
B_2	$G\gamma_1/13+J\beta_3/6$
B_3	$J\beta_3/6$
B_4	$G(\beta_1/8+\gamma_1/13+\delta_1+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+H\gamma_2/4+J\beta_3/6$
B_5	$G\gamma_1/13+H\gamma_2/4+J\beta_3/6$
B_6	$G\gamma_1/13+H\gamma_2/4+J\beta_3/6$
C_1	$G(\alpha_1/3+\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\alpha_2/4$
C_2	$G(\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\beta_2/3$
C_3	$G(\alpha_1/3+\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\alpha_2/4$
C_4	$G(\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\beta_2/3$
C_5	$G(\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\beta_2/3$
C_6	$G(\alpha_1/3+\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\alpha_2/4$
C_7	$G(\beta_1/8+\gamma_1/13+\varepsilon_1/8+\eta_1/8)+J\gamma_3/7+H\alpha_2/4$

根据表5所示的各项指标重要度值,确定判断矩阵 X 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & & & x_{1n} \\ & \ddots & & \\ & & x_{ij} & \\ & & & \ddots \\ & & \frac{1}{x_{ij}} & & \\ & & & & \ddots \\ \frac{1}{x_{1n}} & & & & & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, n 为评估指标总数; x_{ij} 为指标 i 相对于指标 j 的重要程度, 其取值范围为 $0 \sim 9$, 数值越大表示相对重要程度越高。若 x_{ij} 不满足取值范围要求, 则需重新调整各项指标重要度的值, 例如 $x_{13} = \frac{G\gamma_1/13 + J\alpha_3/2}{H\gamma_2/4 + J\beta_3/6}$ 。

计算权重矩阵。对判断矩阵 $\mathbf{X}$ 进行归一化计算, 常用的方法有算术平均法、几何平均法、特征根法、最小二乘法、对数最小二乘法等, 得到各项评估指标权重矩阵 $\mathbf{A}$ 。

$$\mathbf{A} = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_i \ \cdots \ a_n]^T \quad (14)$$

其中, a_i 为指标 i 的归一化权重, 取值范围为 $0 \sim 1$ 。

判断矩阵的一致性检验。计算判断矩阵的最大特征根、随机一致性指标、随机一致性比率, 并验证其是否满足要求, 若不满足则需调整判断矩阵中元素, 直至满足要求, 保证指标权重的合理性。一致性检验及调整方法参见文献[8]。

2.2 熵权法修正

AHP 是主观赋权的多目标决策方法, 熵权法则属于客观赋权分析法, 它利用各指标熵值所提供的信息量的大小来决定指标权重, 熵值越小, 指标所包含信息量越大, 权重越高。AHP 与熵权法结合可使各指标权重更具说服力^[6]。熵权法修正计算步骤如下。

a. 对判断矩阵各行进行归一化计算, 得到其标准化矩阵为 $\bar{\mathbf{X}}$ 。

b. 计算熵权矩阵。将标准化判断矩阵 $\bar{\mathbf{X}}$ 按照式(15)~(17)进行熵权法分析, 计算出各测试项权重矩阵 $\mathbf{B}$ 。

$$y_i = 1 + k \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} \ln \bar{x}_{ij} \quad k = (\ln n)^{-1} \quad (15)$$

$$b_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_i \ \cdots \ b_n]^T \quad (17)$$

其中, y_i 为各试验项信息熵。

c. 计算综合权重。通过熵权矩阵 $\mathbf{B}$ 对权重矩阵 $\mathbf{A}$ 的指标权重进行修正, 得出各项指标的综合权重值 q_i 及基于 AHP 和熵权法的综合权重矩阵 $\mathbf{Q}$ 。

$$q_i = \frac{a_i b_i}{\sum_{i=1}^n a_i b_i} \quad (18)$$

$$\mathbf{Q} = [q_1 \ q_2 \ \cdots \ q_i \ \cdots \ q_n]^T \quad (19)$$

2.3 综合评分

充电机运行状态多指标综合评估流程见图 2。

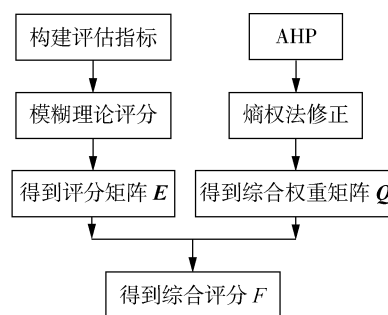


图 2 充电机运行状态评估流程图

Fig.2 Flowchart of running state evaluation for charger

根据模糊理论得到充电机运行状态评估指标评分矩阵 $\mathbf{E}$, 以及据 AHP 和熵权法得到权重矩阵 $\mathbf{Q}$, 得充电机运行状态综合评分 F 为:

$$F = \mathbf{E}\mathbf{Q} \quad (20)$$

取充电机运行状态综合评估的优、良、差三级评语的评分 F 分别为 $80 \sim 100$ 分、 $60 \sim 80$ 分和 60 分以下。其中, 优表示充电机处于最佳运行状态, 无检修需求; 良表示充电机能够正常运行, 但各项指标处于临界状态, 需要定期的检修维护; 差表示充电机运行状态会对配电网、动力电池及其自身产生恶劣影响或充电机发生运行故障, 需要维修。

3 算例分析

以广泛应用于充换电站的 10 kW (额定电压为 100 V , 额定电流为 100 A) 充电机模块为基本单元进行算例验证。

根据已有检测平台积累的检测数据及专家意见, 设定 $G:H:J=0.3:0.3:0.4$; 根据文献[6]、[13]、[19]配电网承载能力评估方法及专家意见, 设定 $\alpha_1:\beta_1:\gamma_1:\delta_1:\varepsilon_1:\eta_1=1/6:1/6:1/6:1/6:1/6:1/6$; 基于文献[11]、[22-23]动力电池的检测评估方法及专家意见, 设定 $\alpha_2:\beta_2:\gamma_2=1/3:1/3:1/3$; 根据文献[5]、[7]充电机检测标准及方法, 结合已有充电机检测平台数据, 设定 $\alpha_3:\beta_3:\gamma_3=0.2:0.4:0.4$ 。则根据表 5 计算得评估指标重要度之比为 $A_1:A_2:B_1:B_2:B_3:B_4:B_5:B_6:C_1:C_2:C_3:C_4:C_5:C_6:C_7=1.3:1.3:2.6:2.1:2.1:5.1:2.6:3.1:5.1:4.1:5.1:4.1:4.1:5.1:4.6$ 。

基于各项指标重要度构造判断矩阵如式(21)所示。

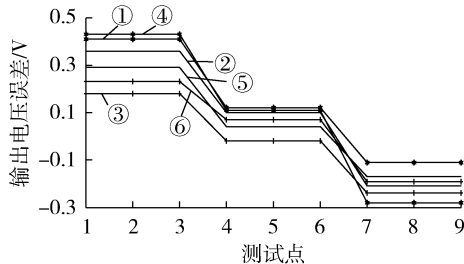
判断矩阵 $\mathbf{X}$ 经过 AHP 计算形成权重矩阵 $\mathbf{A}=0.01 \times [2.5 \ 2.5 \ 5 \ 4 \ 4 \ 9.7 \ 5 \ 5.9 \ 9.7 \ 7.8 \ 9.7 \ 7.8 \ 7.8 \ 9.7 \ 8.9]^T$ 。

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.5 & 0.62 & 0.62 & 0.25 & 0.5 & 0.42 & 0.25 & 0.32 & 0.25 & 0.32 & 0.32 & 0.27 & 0.28 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0.62 & 0.62 & 0.25 & 0.5 & 0.42 & 0.25 & 0.32 & 0.25 & 0.32 & 0.32 & 0.27 & 0.28 \\ 2 & 2 & 1 & 1.24 & 1.24 & 0.51 & 1 & 0.84 & 0.51 & 0.63 & 0.51 & 0.63 & 0.63 & 0.51 & 0.57 \\ 1.62 & 1.62 & 0.81 & 1 & 1 & 0.41 & 0.81 & 0.68 & 0.41 & 0.51 & 0.41 & 0.51 & 0.51 & 0.41 & 0.46 \\ 1.62 & 1.62 & 0.81 & 1 & 1 & 0.41 & 0.81 & 0.68 & 0.41 & 0.51 & 0.41 & 0.51 & 0.51 & 0.41 & 0.46 \\ 3.92 & 3.92 & 1.96 & 2.43 & 2.43 & 1 & 1.96 & 1.65 & 1 & 1.24 & 1 & 1.24 & 1.24 & 1 & 1.11 \\ 2 & 2 & 1 & 1.24 & 1.24 & 0.51 & 1 & 0.84 & 0.51 & 0.63 & 0.51 & 0.63 & 0.63 & 0.51 & 0.57 \\ 2.38 & 2.38 & 1.19 & 1.48 & 1.48 & 0.61 & 1.19 & 1 & 0.61 & 0.76 & 0.61 & 0.76 & 0.76 & 0.61 & 0.67 \\ 3.92 & 3.92 & 1.96 & 2.43 & 2.43 & 1 & 1.96 & 1.65 & 1 & 1.24 & 1 & 1.24 & 1.24 & 1 & 1.11 \\ 3.15 & 3.15 & 1.58 & 1.95 & 1.95 & 0.8 & 1.58 & 1.32 & 0.8 & 1 & 0.8 & 1 & 1 & 0.8 & 0.89 \\ 3.92 & 3.92 & 1.96 & 2.43 & 2.43 & 1 & 1.96 & 1.65 & 1 & 1.24 & 1 & 1.24 & 1.24 & 1 & 1.11 \\ 3.15 & 3.15 & 1.58 & 1.95 & 1.95 & 0.8 & 1.58 & 1.32 & 0.8 & 1 & 0.8 & 1 & 1 & 0.8 & 0.89 \\ 3.15 & 3.15 & 1.58 & 1.95 & 1.95 & 0.8 & 1.58 & 1.32 & 0.8 & 1 & 0.8 & 1 & 1 & 0.8 & 0.89 \\ 3.92 & 3.92 & 1.96 & 2.43 & 2.43 & 1 & 1.96 & 1.65 & 1 & 1.24 & 1 & 1.24 & 1.24 & 1 & 1.11 \\ 3.54 & 3.54 & 1.77 & 2.19 & 2.19 & 0.9 & 2.19 & 1.48 & 0.9 & 1.12 & 0.9 & 1.12 & 1.12 & 0.9 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

基于熵权法计算得到熵权矩阵 $B = 0.01 \times [6.57 \ 6.57 \ 6.67 \ 6.65 \ 6.65 \ 6.67 \ 6.67 \ 6.68 \ 6.67 \ 6.7 \ 6.67 \ 6.7 \ 6.7 \ 6.67 \ 6.75]^T$ 。

根据式(18)对权重矩阵 A 进行修正,得到各项试验的指标综合权重矩阵 $Q = 0.01 \times [2.46 \ 2.46 \ 4.99 \ 3.98 \ 3.98 \ 9.69 \ 4.99 \ 5.9 \ 9.69 \ 7.82 \ 9.69 \ 7.82 \ 9.69 \ 9]^T$ 。

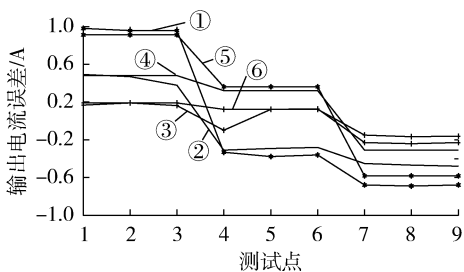
在各项指标评分过程中,通过充电机综合评估测试系统(检测装置参见文献[24])采集各项指标测试数据。以输出电压误差 C_3 及输出电流误差 C_4 为例,得到的测试结果分别如图3、4所示。



① 综合评估 100 V, ② 综合评估 75 V, ③ 综合评估 50 V
④ 检测平台 100 V, ⑤ 检测平台 75 V, ⑥ 检测平台 50 V

图3 综合评估测试的输出电压误差

Fig.3 Output voltage error of comprehensive evaluation



① 综合评估 100 A, ② 综合评估 50 A, ③ 综合评估 20 A
④ 检测平台 100 A, ⑤ 检测平台 50 A, ⑥ 检测平台 20 A

图4 综合评估测试的输出电流误差

Fig.4 Output current error of comprehensive evaluation

由图3可知,综合评估测试的输出直流电压在相应的调节数值上保持稳定,充电机输出电压误差小于 $\pm 0.5\%$,即被测充电机稳压性能正常。由图4可知,综合评估各测试点输出电流误差 $|\Delta I| < 1\%$,即被测充电机稳流精度合格。并通过图4、5中综合评估结果与已投运检测平台(检测平台参见文献[24])实验数据对比,证实了综合评估测试数据的有效性。

依据模糊理论评分式(5)~(11)对指标 C_3 、 C_4 进行评分,二者得分均为 100 分。通过对各项指标测试数据的评分,得到评分矩阵 $E = [90 \ 86 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 100 \ 79 \ 85 \ 97 \ 100 \ 100 \ 100 \ 80 \ 91 \ 81]$ 。

给综合权重矩阵 Q 赋值相应评估指标,根据式(20)对被测充电机运行状态进行评估,根据被测充电机运行状态得到评估得分 $F = 93.04$ 分。采用组态王软件进行算例验证,得到综合评估结果如图5所示。可见被测充电机运行状态显示为优,与已投运检测平台的测试报告一致,验证了该综合评估方

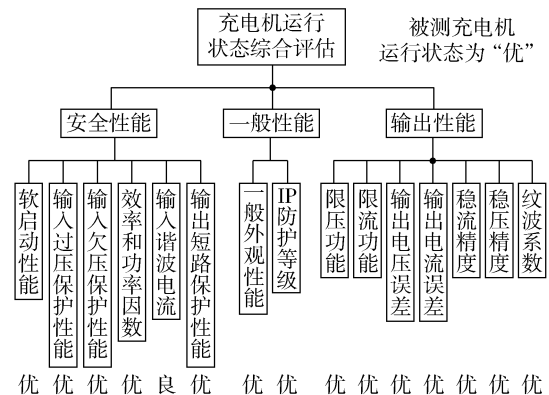


图5 综合评估结果

Fig.5 Result of comprehensive evaluation

案的有效性;且各项评估指标显示结果与测试数据结果一致,验证了评估指标模糊理论评分方法的有效性。

4 结论

本文提出了电动汽车充电机运行状态多指标综合决策评估方法,可实现充电机模块全面可靠的运维检测评估。根据模糊理论法对各项评估指标进行评分,计及充电机对电网、动力电池及其自身安全可靠等多种影响因素,采用 AHP 和熵权法综合决策评估方法对各项评估指标进行权重赋值,最终得到被测充电机的各项指标及整体运行状态。评估结果将作为运维检修依据,可保障充电机的可靠运行,同时有利于相关检测标准的完善和运维数据的积累。由于电动汽车推广与充换电设施建设相辅相成,完善的充换电设施运维及评估体系将为电动汽车的大规模推广保驾护航。

参考文献:

- [1] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[C]//Power & Energy Society General Meeting, 2009. Calgary, AB, Canada; IEEE, 2009: 1-6.
- [2] SORTOMME E, HINDI M M, MACPHERSON S D J, et al. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.
- [3] 田立亭, 张明霞, 汪免伶. 电动汽车对电网影响的评估和解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 43-49.
TIAN Liting, ZHANG Mingxia, WANG Huanling. Evaluation and solutions for electric vehicles impact on the grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 43-49.
- [4] 严辉, 李庚银, 赵磊, 等. 电动汽车充电站监控系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 15-19.
YAN Hui, LI Gengyin, ZHAO Lei, et al. Development of supervisory control system for electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 15-19.
- [5] 李国栋, 陈振, 吕金炳, 等. 移动式电动汽车充换电站检测方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(2): 45-49.
LI Guodong, CHEN Zhen, LÜ Jinbing, et al. Mobile detection scheme of electric vehicle charging station[J]. Proceedings of the GSU-EPSA, 2017, 29(2): 45-49.
- [6] 陈卫, 杨波, 张兆云, 等. 计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 27-35.
CHEN Wei, YANG Bo, ZHANG Zhaoyun, et al. Distribution networks supportability evaluation and optimization considering electric vehicles charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 27-35.
- [7] 中国电力企业联合会. 电动汽车非车载传导式充电机技术条件: NB/T 33001—2016[S]. 北京: 中国社会科学出版社, 2016.
- [8] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007, 29(1): 153-156.
- CHANG Jian'e, JIANG Taili. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2007, 29(1): 153-156.
- [9] 顾越. 电动汽车充电机及其电气性能测试研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
GU Yue. Study on off-board electric vehicle charger and its electrical performance test[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [10] 李晶, 姜久春. 纯电动汽车充电机系统稳定性研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 13-17.
LI Jing, JIANG Jiuchun. System stability of battery for battery electric vehicle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 13-17.
- [11] CUI X, SHEN W, ZHENG J. New on-line approach for lithium iron phosphate battery pack balancing based on state of charge[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Pattaya, Thailand; IEEE, 2016: 762-767.
- [12] 郭建龙, 文福拴. 电动汽车充电对电力系统的影响及其对策[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 1-9, 30.
GUO Jianlong, WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 1-9, 30.
- [13] 苏海峰, 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.
- [14] 李博远. 基于故障树和层次分析法的可靠性分配方法研究及系统实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
LI Boyuan. Study on FTA and AHP based reliability allocation method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
- [15] 冯亮. 电动汽车充电站规划研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
FENG Liang. Electric vehicle charging station planning[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [16] 朱学贵, 覃阳, 苏向丰, 等. 电动汽车充电机对电能计量的影响[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 52-57.
ZHU Xuegui, QIN Yang, SU Xiangfeng, et al. Impact of electric vehicle charger on electric energy metering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 52-57.
- [17] MUKESH S, KANNAN T, PRAVEEN K, et al. Real-time coordination of electric vehicles to support the grid at the distribution substation level[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(3): 1000-1010.
- [18] KESLER M, KISACIKOGLU M C, TOLBERT L M. Vehicle-to-grid reactive power operation using plug-in electric vehicle bidirectional offboard charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6778-6784.
- [19] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [20] 杨少兵, 吴命利, 姜久春, 等. 电动汽车充电站负荷建模方法

- [J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1190-1195.
- YANG Shaobing, WU Mingli, JIANG Jiuchun, et al. An approach for load modeling of electric vehicle charging station [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1190-1195.
- [21] 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 Lifang, LIAO Chenglin. Research on power-charging demand of large scale electric vehicles and its impacting factors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27.
- [22] KUPERMAN A, SITBON M, GADELOVITS S, et al. Single-source multi-battery solar charger; analysis and stability issues [J]. Energies, 2015, 8(7): 6427-6450.
- [23] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状及发展趋势 [J]. 电网技术, 2011, 35(4): 1-7.
- SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles [J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 1-7.
- [24] 刘亚丽, 李国栋, 胡波, 等. 电动汽车非车载充电机检测平台的建立与实践 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 98-102.
- LIU Yali, LI Guodong, HU Bo, et al. Inatallation and practice for detection platform of electric vehicle off-board charger [J]. Proceedings of the GSU-EPSSA, 2015, 27(11): 98-102.

作者简介:



杨月新

杨月新(1990—),女,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充换电设施检测 (**E-mail**: yangyuexin@tjuedu.cn);

车延博(1972—),男,山东聊城人,副教授,博士,主要研究方向为电力电子与电力传动、分布式发电系统集成 (**E-mail**: Lab538@163.com)。

Multi-index comprehensive evaluation of running state for electric vehicle charger

YANG Yuexin¹, CHE Yanbo¹, YANG Lixun²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Tiangao Induction Heating Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: With the large-scale application of the electric vehicles, the bad performance of plug capability, the error of output index and the unqualified of safety performance will affect the performance of chargers during the operational process. In this regard, a multi-index comprehensive evaluation method of running state for charger is proposed. The grading method of the indexes is illustrated, and the evaluation index system of the running state for charger is constructed based on the analysis of existing standards. The influences of massive employment of chargers on power grid stability, power battery life and its own security and reliability are analyzed, based on which the importance of each evaluation index can be determined. Then the weights of the evaluation indexes are achieved by the combination of AHP (Analytic Hierarchy Process) and the entropy weight correction methods. Consequently, the comprehensive weight matrix of evaluation indexes is formulated. Results of case analysis show that the multi-index comprehensive evaluation approach provides intuitive and reliable results, which coincide practical engineering.

Key words: electric vehicles; charger; entropy weight method; analytic hierarchy process method; state evaluation