

电动汽车电网适应性测试技术概述

刘元治^{1,2} 宋希龙^{1,2} 王伯军^{1,2} 李威^{1,2}

(1. 中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013; 2. 高端汽车集成与控制全国重点实验室, 长春 130013)

【欢迎引用】刘元治, 宋希龙, 王伯军, 等. 电动汽车电网适应性测试技术概述[J]. 汽车文摘, 2024(8): 48-55.

【Cite this paper】LIU Y Z, SONG X L, WANG B J, et al, Overview on Electric Vehicle Grid Adaptability Testing Technology[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(8): 48-55.

【摘要】电动汽车的保有量迅速提升, 因电网异常导致的充电问题随之出现, 电动汽车电网适应性测试是行业内急需应用的热点技术。电网适应性测试技术可应用于整车充电系统或交流充电桩、直流充电桩、车载充电机以及高集成度充电总成, 提升充电生态产品的开发质量。为深度适应用户不同场景的充电需求, 汽车行业需要全面分析全球电网制式差异, 梳理异常电网原理, 在电网制式、电网跌落、电网陡升以及电网谐波方面开发覆盖用户充电工况的测试方案, 电动汽车充电产品面向市场前被充分验证, 规避潜在的电网异常相关的充电问题。

关键词: 电动汽车; 充电系统; 电网跌落; 电网陡升; 电网谐波

中图分类号: U464.1+9 文献标识码: A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230228

Overview on Electric Vehicle Grid Adaptability Testing Technology

Liu Yuanzhi^{1,2}, Song Xilong^{1,2}, Wang Bojun^{1,2}, Li Wei^{1,2}

(1. Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013; 2. National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

【Abstract】The ownership of electric vehicle(EV) is rapidly increasing, and charging issues caused by grid abnormal power are consequently emerging. EV adaptability testing has become a hot technology urgently needed in the industry. Grid adaptability testing technology can be applied to vehicle charging systems or AC charging piles, DC charging piles, in vehicle chargers, and high integration charging assemblies to improve the development quality of charging ecological products. To deeply adapt to the demands for charging of users in different scenarios, the automotive industry needs to comprehensively analyze the differences in global power grid systems, sort out the principles of abnormal power grids, and develop testing plans covering user charging conditions in terms of power grid systems, power grid drop, power grid steep rise, and power grid harmonics. Electric vehicle charging products should be fully validated before launch to avoid potential abnormal charging problems about the power grid.

Key words: Electric vehicle(EV), Charge system, Power grid drop, Power grid steep rise, Power grid harmonics

0 引言

全球新能源汽车保有量大幅提升^[1], 国内新能源汽车销往世界各地, 出口数量呈增长态势^[2]。全面考虑各国电网制式标准, 分析标准差异对新能源汽车充电系统的影响至关重要。此外, 供电系统产生的电网波动、电网谐波对新能源汽车寿命、充电安全、充电效率以及电网配电网的安全运行都产生影响^[3-6]。电

动汽车充电产品丰富多样, 包含交流充电桩、直流充电桩、车载充电机以及高集成度的车载充电产品, 各汽车企业对于充电相关产品开发深度不一致, 标准差异大, 各充电产品企业开发深度不足, 装车匹配后问题频发, 目前行业内暂无适用于电动汽车的标准化电网适应性测试。本文通过梳理一部分国家和地区的电网制式标准差异、充电异常故障原理与异常电网现象^[7-10], 定量分析不同电压、电流、频率、相位, 提出了

一种电网适应性测试台架及电网适应性测试方案,针对充电产品及可外接充电型电动汽车进行功能验证。该测试技术能够覆盖不同国家电网制式与电动汽车充电异常工况,满足充电产品开发验证需求,为电动汽车用户提供充电质量保障。

1 电网质量现状分析

电压、电流或频率的偏差,可能会导致用户设备发生故障或无法正常运行。衡量电能电压质量与电流质量最为关键。

电压质量是指提供实际与理想电压值的偏差,以判断供电部门给用户分配的电力是否达标。一般涵盖电压偏差、不平衡、电压波动、冲击性瞬变、电压短时变动、电压长时变动、谐波畸变、电压偏差。电流质量包括电流谐波、间谐波或次谐波、电流相位的超前或滞后、噪声。

2 异常电网现象分析

2.1 全球电网制式

全球 165 个国家设计电网制式 16 种,电压幅值与频率各不相同(图 1)。其中 48 个国家采用电压 220 V、频率 50 Hz,56 个国家采用电压 230 V、频率 50 Hz。

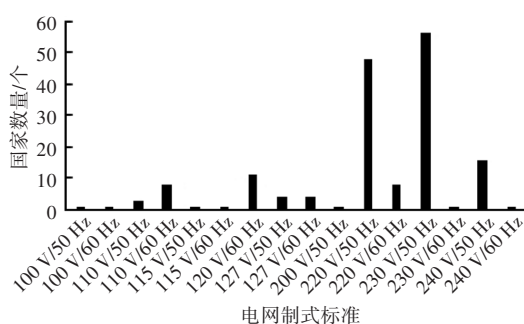


图1 全球国家电网制式数量分布

2.2 电网质量异常现象分析

除各国制定的电网制式标准不同外,各种产生非线性负荷的设备^[12]如逆变器、变频器、电力牵引机车、电弧炉、半导体调压和调相装置都会对电力系统造成影响,导致电网波动和电网谐波。其中异常电网现象分为 8 类:瞬变、长时间电压变动、短时间电压变动、电压不平衡、波形畸变、电压波动、电压偏差、电力系统频率偏差。

2.2.1 瞬变现象

电能质量瞬变现象可分为冲击和振荡 2 类。

(1)冲击性瞬变。冲击性瞬变是指在正弦稳态条

件下,电压和电流非额定频率、无正负极性的突然变化。例如雷电引起的冲击压与电流如图 2 所示,图中 I_{ch} 为冲击电流; U 为对地电位; t 为时间。

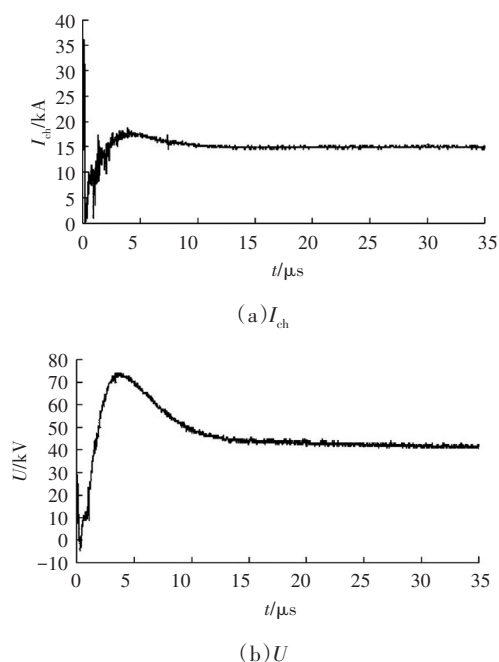


图2 雷电引起的冲击压与电流^[11]

(2)振荡瞬变。振荡瞬变是指供电电路在短路、断路或者接触不良时发生的不稳定现象。系统中同时运行的发电机之间的电势差和相位角差随时间发生变化,导致电流和电压出现振荡,电信号快速交替变化,并会在 1 个周期内衰减到零。振荡现象分为高频振荡、中频振荡与低频振荡,其中高频振荡频率高于 500 kHz,通常由于冲击性瞬变对供电电路造成影响而产生;中频振荡频率为 5~500 kHz,低频振荡频率小于 5 kHz,二者通常由于电容组充能造成。

此外,大型变流器在换相过程中,短暂相位间短路引起电压波形畸变也会引发振荡瞬变。

2.2.2 短时电压变动

短时电压变动包括电压暂降、电压暂升和短时电压中断现象。

(1)电压暂降和暂升。电压暂降是供电电路中的电压在短时间内突然下降到标准值以下,随后立即回升至标称电压范围的现象,持续时间介于 10~600 ms^[9]。

电压暂降主要由供电系统单相接地故障、大型电机的启停、大容量负荷的启停及电网系统中负载的间歇性工作导致。

反之,电压暂升是供电电路中的电压在短时间内骤升到标准值以上,随后立即下降到标称电压允许范

围的现象。电压暂升通常由电网系统中大型负载停止工作、甩负荷导致。

(2)短时电压中断。短时电压中断是系统故障的一种,表现为短时间内供电电压在60 s内降低到0.1倍标称电压以下。短时间电压中断现象由系统故障、通电设备故障或控制失灵造成。

2.2.3 长时电压变动

长时电压变动是一种常见的电网故障,相电压偏离额定值,且持续时间超过60 s的电网异常现象。长时电压变动的原因有多种,包括负荷投切、输电线路过长和节电降压。

(1)过电压。过电压是指电力系统中交流电压有效值超过额定值的10%,且持续时间超过60 s的电压变动现象。过电压分为外过电压和内过电压2种类型。直击雷和感应雷是外过电压的2种形式,而工频过电压、操作过电压和谐振过电压是内过电压的3种形式。

(2)欠电压。欠电压是电力系统中交流电压有效值低于额定值的90%,且持续时间超过60 s的电压变动现象。欠电压现象通常由于供电线路过长、用电负载过大、变压器故障、电源中断或三相负载不平衡导致。

2.2.4 电压不平衡

电压不平衡是指三相电压的幅值不同或相对正常电压存在相位偏移,通常用负序电压、零序电压与正序电压之比的百分数形式表示电压不平衡的程度。供电系统中不平衡的负荷、换位输电线路会造成电压不平衡。

2.2.5 波形畸变

电网波形畸变是指电网中的电流或电压波形偏离理想正弦波形,通常由于非线性设备(铁磁饱和型设备、电子开关型设备、电弧型设备)在电网中工作时产生。这些非线性设备在电网中工作时,其电流和电压波形不是理想的正弦波,而包含了许多高次谐波和间谐波成分。其中铁芯设备在电网中产生的电网谐波特点为3、5、7次谐波,且谐波电流大小与电压有关,电压越高,谐波电流越大;变压器中的谐波含有大量3次及3倍次谐波电流;电力机车类设备在电网系统中产生的谐波具有不对称、非线性、波动性和功率大的特点;电弧炉类设备在电网系统中产生的谐波电流以2、3、4、5、7次为主,且含有偶次谐波。谐波电流随着工业发展在供电电网中呈现复杂化、多次化,对电动汽车充电造成极

大困扰。

(1)谐波。电网谐波是指电网中的电流或电压波形上出现的一系列波动成分,这些波动成分的频率是电源频率的整数倍。谐波波形可进行傅里叶变换,得出非基波整数倍频率的分数谐波或间谐波。次谐波则是指频率低于工频基波频率的分量。另外,谐波是稳态、连续、具有周期性的现象(图3)。

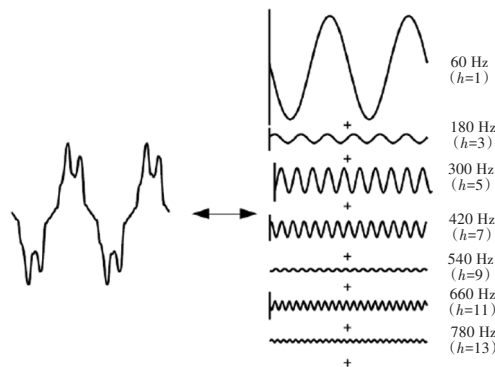


图3 谐波分析示意

(2)间谐波。间谐波是指电网中的电流或电压波形上出现的具有一定频率的非整数级波形。这些波动成分的频率和幅度会随着时间的变化而变化,且波动频率与基波频率呈现非线性关系。

(3)直流偏置。直流偏置是指在供电系统中,存在直流电压或直流电流的成分现象。直流偏置过大会导致功耗增加,电动汽车充电效率低;直流偏置过低则会降低放大器的效益。

(4)噪声。噪声是指在电网系统中,宽带频谱0~200 kHz范围内叠加在相线、中性线和信号线的无用信号。

电网噪声的来源分为两大类。电网中设备的运行状态不稳定、开关的切换会产生噪声,电网中的谐波和间谐波也会对整个电网系统产生干扰。

2.2.6 电压波动和闪变

电压波动定义为电压有效值一系列相对快速变动或连续改变的现象。其变化周期大于工频周期。

引起电压波动的原因有多种,系统原因有大型整流设备的投切、系统发生短路,其中功率冲击性波动负荷的工作状态变化会导致长时间的电压波动。实际运行中认为波动性负荷是引起供电电压波动的主要原因。

配电系统中,电压波动现象有可能多次出现,电压波动的图形随机呈现跳跃形、斜坡形或准稳态形。

2.2.7 电压偏差

供电系统在正常运行方式下,某一节点的实际电压与系统标称电压之差对系统标称电压的比值称为该节点的电压偏差。

目前我国对 35 kV 及以下供电电压规定了允许电压偏差,具体情况如下:

(1)35 kV 及以上供电电压的正、负偏差的绝对值之和不超过标称电压的 10%;

(2)10 kV 及以下三相供电电压允许偏差为标称电压 $\pm 7\%$;

(3)220 V 单相供电电压允许偏差上限为 107% 标称电压,下限为 90% 标称电压^[7]。

2.2.8 电力系统频率偏差

电力系统中正弦交变电压的变化频率为电力系统频率。在发电机组稳态运行时,机组中所有发电机都在同步运转,整个电力系统处于同频运行状态。但当电力系统的某些部分发生故障时,可能引起整个系统的频率变化,正常偏差允许值为 0.2 Hz,当电网装机容量达到 3 GW 时,频率偏差可放宽到 0.5 Hz^[9]。

3 电网适应性测试方案建议

3.1 电网适应性测试方案阐述

为适应不同销售地区的电网制式,充电产品需要全面考虑地区电网特性,在研发阶段进行充分验证。除此之外,在异常电网方面,需要针对市场电网质量 8 类异常状态进行测试,保障产品在不同方式的电网波动、电网谐波下安全高效工作。总结出电网制式、电网波动、电网谐波以及组合波形测试 5 种测试方案。电网适应性测试台架如图 4 所示,交流电源与交流充电桩通过相线连接,充电枪插接在充电座上,给车端提供电压与控制引导(Control Pilot, CP)信号。车载充电机低压接口连接低压电源与高压负载,电脑通过控制器局域网(Controller Area Network, CAN)设备与车载充电机进行通信。在电网适应性测试中通过调节交流电源,模拟电网输出端的不同电压状态,测试充电产品的适应性。台架测试中产品包括交流桩和车载充电机(图 5)。此外,也可以进行直流充电桩测试、充电系统测试或实车测试。

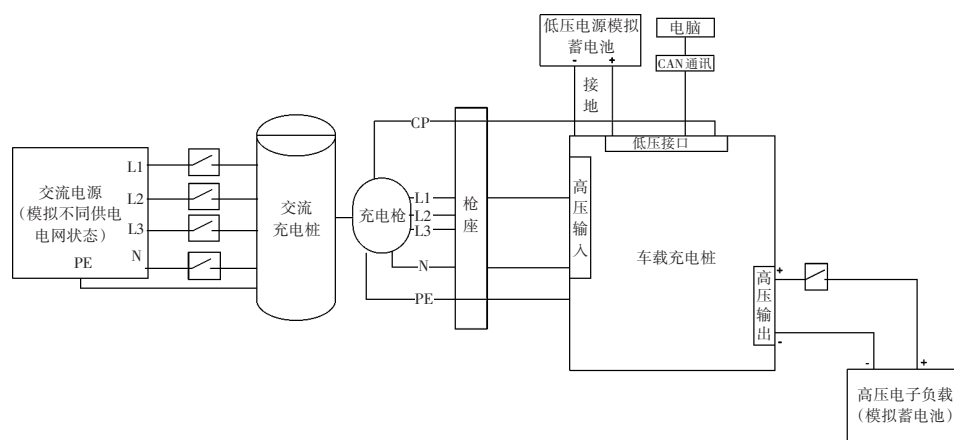


图 4 电网适应性测试台架示意



图 5 待测充电总组件示意

3.2 电网制式

针对销往不同国家和地区的车辆,需要根据当地电网制式进行测试。全球电网制式有 16 种,应用穷举

法,列出所有制式电压与频率测试变量,编写测试方案。确定待测物为直流充电桩、交流充电桩、车载充电机与充电实车,搭建电网适应性测试台架进行全面验证,电网制式测试方案如表 1 所示。

3.3 电网波动

为了确保在电网波动情况下充电系统的稳定运行,需要过电网瞬变、电压暂降、电压陡升、短时电压中断、输入电压范围以及电压不平衡因素进行有效保障。

3.3.1 电网跌落

电网跌落测试包括电网丢波、电压跌落、输入缓慢降低、反复上电下电、相不平衡测试。

电网丢波测试为 0~10 ms 内的周期性电网跌落,

包括阶梯波形丢失、1/8波形丢失、1/4波形丢失、3/8波形丢失、1/2波形丢失,如图6、图7所示。

表1 电网制式测试方案

序号	电压/V	频率/Hz
1	100	50
2	100	60
3	110	50
4	110	60
5	115	50
6	115	60
7	120	60
8	127	50
9	127	60
10	200	50
11	220	50
12	220	60
13	230	50
14	230	60
15	240	50
16	240	60

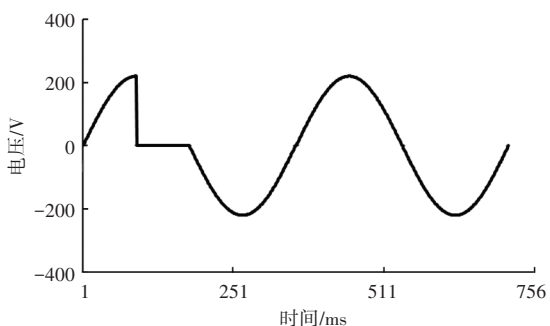


图6 1/4波形丢失示意

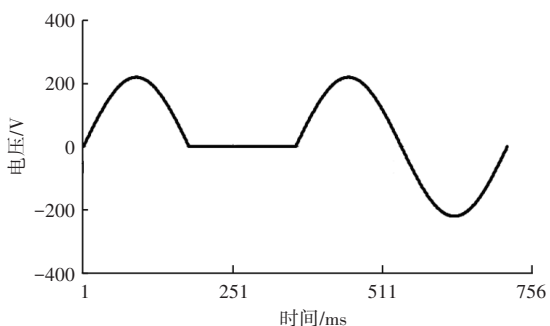


图7 1/2波形丢失示意

电压跌落测试为供电电压有效值快速下降到跌落电压,持续一段时间后恢复至标准值。参考电网波动系列国际标准及电网波动和国家标准^[7,9],列出标准规定范围内的电网波动值,使用等价类划分法与边界值法综合设计电压暂降测试方案,总结得出以下电压暂降测试点(以国内标准单相供电电压

220 V为例)。除此之外,应充分了解市场公用充电站与私人充电桩电压暂降现状^[13,15,18,19],采集市场充电异常波形,进行实地测试,或保存异常波形,使用电网适应性台架模拟异常电网,电压暂降测试方案如表2所示。在实验室进行测试,确保充电系统能在不同环境下正常工作。

表2 电压暂降测试方案

跌落电压/V	持续时间
198	20 ms, 3 s
187	10 ms, 20 ms, 50 ms, 200 ms, 500 ms, 600 ms, 1 s, 5 s, 10 s, 60 s
176	10 ms, 20 ms, 30 ms, 200 ms, 240 ms, 500 ms, 600 ms, 5 s, 6 s, 10 s, 60 s
154	10 ms, 20 ms, 200 ms, 240 ms, 400 ms, 500 ms, 600 ms, 5 s, 6 s
88	10 ms, 20 ms, 200 ms, 240 ms, 500 ms, 600 ms, 5 s, 6 s
0	10 ms, 20 ms, 200 ms, 240 ms, 500 ms, 600 ms, 5 s, 6 s

输入缓慢降低测试是指输入电压按照一定速率缓慢降低(包括肯尼亚波形),缓慢降低到输入欠压点、欠压点循环。其中欠压点为电动汽车充电系统中各总成件输入电压下限值。

反复上电下电测试是指在各种不同的相位角进行反复开关机。采用等价类划分法整理电压相位角域集合,并将其划分成4部分,选取0°、45°、90°、135°典型值作为相位角变量,依据充电产品软件设计策略选取5 s、30 s、60 s典型值作为时间变量,进行反复上电下电测试,如表3所示。

表3 反复上电下电测试方案

电压相位角/(°)	时间/s
0	5、30、60
45	5、30、60
90	5、30、60
135	5、30、60

相不平衡测试为模拟三相带载不均或空开跳闸导致相不平衡或者缺相,包括反复相不平衡(单相、2相、3相),和反复缺相(缺1组、2组、N线、PE线)。应用等价类划分法与边界值法相结合,开发相不平衡度测试(表4)。除此之外应充分考虑市场公用充电站与私人充电桩的相不平衡现状,采集电网异常数据进行实车测试或仿真测试^[16,17,20],确保充电系统能在不同环境下正常工作。

表4 相不平衡度测试方案

A相电压/V	B相电压/V	C相电压/V	不平衡度/%
220	220	210	4.55
220	220	230	4.55
220	210	220	4.55
220	230	220	4.55
210	220	220	4.76
230	220	220	4.33
220	230	210	4.55
220	210	230	4.55
253	253	265	4.74
253	253	241	4.74
253	241	253	4.74
253	265	253	4.74
242	253	253	4.55
265	253	253	4.53
253	265	241	4.74
253	241	265	4.74
187	187	196	4.81
187	187	178	4.81
187	196	187	4.81
187	178	187	4.81
196	187	187	4.59
178	186	186	4.49
187	196	178	4.81
187	178	196	4.81
220	233	220	5.91
220	220	233	5.91
220	220	207	5.91
220	207	220	5.91
253	268	253	5.93
253	253	268	5.93
253	253	238	5.93
253	238	253	5.93
187	198	187	5.88

3.3.2 电网陡升

电网陡升测试包括输入缓慢升高、高压波动和瞬态高压测试。

输入缓慢升高测试为输入电压按照一定速率缓慢升高,包括从零缓慢升高到额定电压、过压点循环。其中过压点为电动汽车充电系统中各总成件输入电压上限值。

高压波动测试为供电电压有效值快速上升至陡升电压,持续一段时间后恢复至标准值。参考电网波

动系列国际标准及和国家标准^[7,9],对标准进行总结整理,得出以下电压升降测试点(以国内标准单相供电电压220V为例)。除此之外,应按照市场公用充电站与私人充电桩电压陡升现状^[14]进行测试,确保充电系统能在不同环境下正常工作,相关标准中高压波动测试方案如表5所示。

表5 相关标准中高压波动测试方案

陡升电压/V	持续时间
235.4	3 s
242	10 ms, 20 ms, 50 ms, 200 ms, 500 ms, 600 ms, 1 s, 5 s, 10 s, 60 s
264	30 ms, 400 ms, 60 s
308	3 ms
440	1 ms

瞬态高压测试为模拟开关尖刺或电网谐振过电压,包括操作过电压、瞬态过压、孟加拉波形、毛刺波形、半波陡升、多倍电压、瞬态高压高加速寿命试验(Highly Accelerated Life Test, HALT),如图8、图9所示。

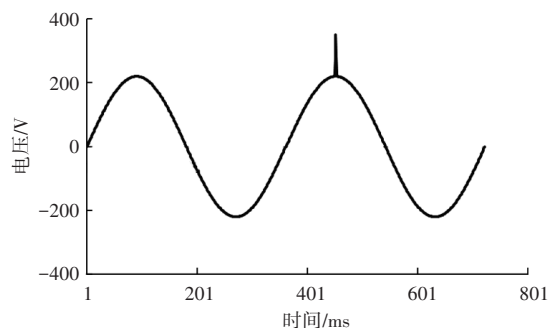


图8 瞬态过压示意

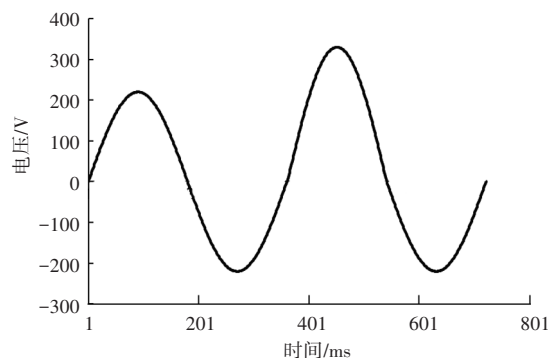


图9 半波陡升示意

3.4 电网谐波测试

通过失真波形、市场谐波、IEC谐波^[10]、频率变化、相位变化5类电网谐波类测试,保障各种异常电网谐波下充电系统能正常工作^[21]。

失真波形测试为模拟部分国家和地区因非线性

带载后导致的电网波形失真,主要测试手段为叠加谐波,包括方波、平顶波、阶梯波、梯形波、三角波,三角波示意如图10所示。

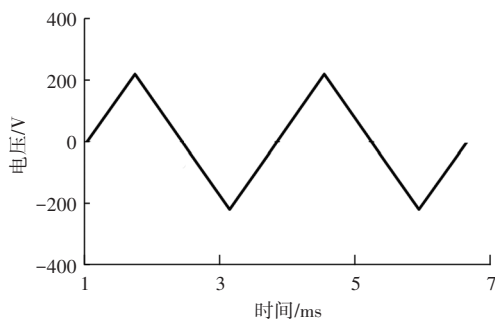


图10 三角波示意

市场波形测试为模拟市场真实存在的谐波,包括在公共充电站、私人充电桩采集的供电电网实际状态及使得市场电动汽车发生故障失效的波形,如图11所示。

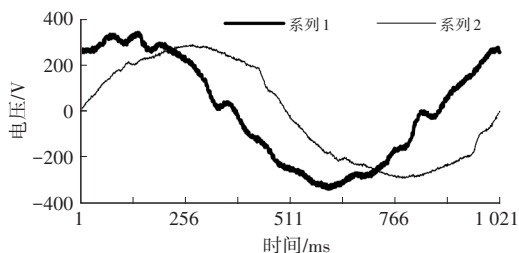


图11 导致电动汽车充电故障的市场波形示意

IEC测试基于IEC标准中的谐波定义,模拟多种IEC谐波,包括1~6倍的IEC谐波失真。表6为IEC谐波标准中测试方案,测试方案参考IEC谐波试验等级3,截取2~10次谐波部分。其中谐波等级为基波频率的整数倍,幅值为基波电压的倍数。

表6 IEC谐波标准中测试方案

谐波等级	电压幅值/%	相位/(°)
2	5	0
2	5	180
3	9	0
3	9	180
4	12	0
5	12	180
6	1.5	0
7	10	0
7	10	180
8	1.5	0
9	4	0
9	4	180
10	1.5	0

频率变化测试为模拟负载突变时,发电机调节慢,导致频率变化,包括频率缓慢变化、突变和频率极限HALT。

相位变换测试为模拟发电机异常导致相位角发生变化,包括1相、2相、3相的相位角变化。

3.5 组合波形测试

依据上述电网跌落、电网陡升和电网谐波测试方案,采用树状分支法进行异常波形组合测试方案设计,保障电网异常波形组合工况下充电系统通过测试后不出现故障。表7为组合波形测试建议方案。

表7 组合波形测试方案

序号	工况	测试方案	仿真工具
1	电网跌落和电网陡升	电压缓慢升高、降低,急剧大幅升高、跌落,电压过压点与欠压点的反复跳变	Wavy
2	电网跌落和电网谐波	电网跌落和电网谐波,低压波动和谐波,反复的上电下电和谐波,相不平衡和谐波	Wavy
3	电网陡升和电网谐波	高压波动和谐波,半波陡升和谐波,多倍压陡升和谐波	Wavy

其中3种工况测试方案通过异常波形导出,得出交流电压随时间变化的波形或经过傅里叶变换后的幅值、相位与频率信息,Wavy软件叠加后进行仿真,可以直接导入电网适应性测试台架的交流电源设备中,进行异常电网的模拟(图12)。

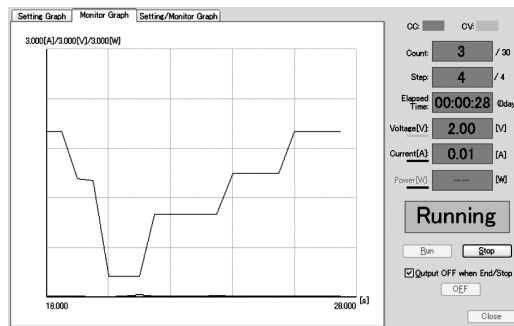


图12 Wavy软件仿真组合波形示意

4 总结

本文通过统计分析全球电网制式,研究电能质量现状,总结异常电网现象与原理,电网质量现状对电动汽车充电系统功能影响较大,为适应电网制式差异与电能质量现状,提出了针对性的电网适应性测试技术。电网适应性测试方案分为2部分,一部分是正常电网测试,包括52种电网制式测试,保障覆盖全球各个国家和地区。另一部分是异常电网测试,包括电网波动、电网谐波以及波形组合。通过以上测试方案,

保障充电系统产品出厂前的功能完善、质量过关,降低市场故障频率,助力电动汽车充电系统产品技术更加成熟可靠,满足市场需求。

在未来发展中,随着电动汽车市场渗透率稳步上升、保有量持续增长以及电动汽车放电功能逐渐成熟,越来越多的高开关频率设备接入供电网络,电网质量将面临更为严峻的挑战。但目前电动汽车对于电网质量现状的适应性研发测试成熟度不足,此外,标准法规的完善和充电安全问题仍是该领域所面临的重要挑战。

因此,对电动汽车电网适应性提出2点建议:

(1)建议新能源汽车企业在开发阶段充分考虑电网现状和用户充电工况,规避电网异常导致的用户负面反馈,在验证阶段搭建电网适应性测试台架,对电网异常的测试用例进行全面检测,提升新能源汽车充电质量。

(2)建议电力行业与汽车行业加强协同合作,通过技术创新,以电网质量现状为载体,开发电动汽车充电适应性标准,保障充电过程安全,共建和谐充电生态。

参 考 文 献

- [1] 郑雪芹. 我国新能源汽车保有量首破千万辆大关[J]. 汽车纵横, 2022(8): 105-107.
- [2] 孙媛. 我国新能源汽车出口现状, 机遇与挑战[J]. 对外经贸实务, 2022(3): 56-59.
- [3] 高少希, 张达敏, 陈伟川, 等. 计及供需两侧的电动汽车有序充放电优化算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 140-147.
- [4] 赵云斌, 李鹏程, 丁同, 等. 考虑多拓扑结构的电动汽车充电机对电网谐波影响分析[J]. 武汉大学学报: 2018, 51(10): 901-906.
- [5] 吴忠强, 张长兴. 考虑配电网负荷的电动汽车分布式充电控制[J]. 汽车工程, 2023, 45(4): 598-608.
- [6] 于东民, 杨超, 蒋林洳, 等. 电动汽车充电安全防护研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2145-2164.
- [7] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量供电电压允许偏差:GB 12325—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [8] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量电力系统频率偏差:GB/T15945—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量电压波动和闪变:GB 12326—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 中国标准化委员会. 电能质量公用电网谐波:GB 14549—93[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [11] 刘浔, 陶礼兵, 蒋圣超, 等. 杆塔雷电冲击接地特性的现场试验与仿真分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 69-70.
- [12] KUNDU S, HISKENS I A. Overvoltage Due to Synchronous Tripping of Plug-in Electric-Vehicle Chargers Following Voltage Dips[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1147-1156.
- [13] ZHANG J, CHEN Z, GUERRERO J M. Effects of Voltage Sags on Electric Vehicle Chargers [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50: 4057-4066.
- [14] OUDALOV A, ZHU J, KEREKES T. Influence of Power Quality on Charging of Electric Vehicles [J] IEEE Transactions, 2015, 6: 3142-3151.
- [15] HARDI S, DAUT I. Sensitivity of Low Voltage Consumer Equipment to Voltage Sags[C]//2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO): IEEE, 2010: 396-401.
- [16] DE HOOG J, ALPCAN T, BRAZIL M, et al. Optimal Charging of Electric Vehicles Taking Distribution Network Constraints into Account[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(1): 365-375.
- [17] ALWAHAIBI S, WHEELER P, RIVERA M, et al. Impact of Grid Unbalances on Electric Vehicle Chargers[J]. Energies, 2023, 16(17): 6201.
- [18] WANG Z, GUO X, LI J, et al. Impact of Voltage Sags on Electric-Vehicle Charger and Critical Voltage Sag Determination[J] IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31: 1397-1399.
- [19] SONG H, XU Y. Study on the Impact of Voltage Sags on Different Types of Electric Vehicle Chargers [C]//China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Xian: IEEE, 2016.
- [20] FARHOODNEA M, MOHAMED A, SHAREEF H, et al. Power Quality Impacts of High-Penetration Electric Vehicle Stations and Renewable Energy-Based Generators on Power Distribution Systems[J]. Measurement, 2013, 46(8): 2423-2434.
- [21] ORR J A, EMANUEL A E, PILEGGI D J. Current Harmonics, Voltage Distortion, and Powers Associated with Electric Vehicle Battery Chargers Distributed on the Residential Power System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984 (4): 727-734.

(责任编辑 梵玲)