

计及负载随机性的设备电压暂降停机概率评估

吴国沛¹,许中¹,何洪彰²,陈伟坤²,钟庆²

(1. 广州供电局有限公司,广东 广州 510600;2. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要:针对电压暂降下设备停机的不确定性,提出计及负载随机性的不同电压暂降下的设备停机概率评估方法。利用电压耐受曲线分析不同电压暂降下设备停机的不确定性,并对残余电压和持续时间表示的二维空间进行区域划分,获得不同区域内的设备停机不确定性特点;根据不同区域内影响设备停机的因素和设备负载率概率密度函数,建立设备停机的概率评估模型,给出概率评估方法的应用流程。以工业中常用的变频调速系统为评估对象,对所提方法进行了验证。该方法有效计及负载随机性和不同负载率下的电压暂降耐受能力,能更准确地反映电压暂降下设备停机的不确定性。

关键词:电能质量;电压暂降;停机概率;电压耐受曲线

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006017

0 引言

电压暂降是指工频电压有效值在短时间内突然下降至额定电压的10%~90%,且持续10ms~1min后恢复正常的短时扰动现象^[1-3]。电压暂降会影响或中断生产过程,严重时还会损害生产设备,造成人身伤亡事故,给工业生产带来严重损失^[4-5]。设备经受过电压暂降后是否停机,受设备运行工况、电压暂降类型和电压暂降特征参数等多种不确定性因素影响^[6-8],因此具有很强的不确定性。经常出现同样的电压暂降有时造成设备停机,而有时却不造成设备停机的现象,导致治理措施决策时无法应对。因此研究设备停机概率的评估方法,对制定经济、合理、有效的电压暂降治理方案非常重要。

目前,评估电压暂降造成设备停机不确定性的方法主要有概率评估法、模糊评估法和最大熵评估法等^[9-17]。概率评估法考虑设备的不确定性且计算量较小,有利于工程应用;模糊评估法的评估结果依赖隶属度函数的选取;最大熵评估法计算过程繁琐、计算量大,不利于工程应用。因此,本文选取概率评估法分析设备电压暂降耐受能力不确定区域的概率分布,获得不同电压暂降水平下设备的停机概率。不同负载率下设备的电压暂降免疫特性差别很大^[18],而同时负载又具有很强的随机性,二者是造成设备停机不确定性的重要因素。然而在确定治理方案时,通常无法准确预知设备的工作状态,因此无法获得设备是否停机的准确评估结果。计及设备负载随机性和不同负载率下设备免疫特性后的停机概率,能更好地反映治理方案投入后带来的经济收益

期望值,并为电压暂降治理决策服务。

为此,本文通过分析测试数据分别获得负载率与设备可耐受残余电压及持续时间阈值的对应关系,并且建立计及负载随机性的设备停机概率评估模型,用于评估设备在不同电压暂降下的停机概率。最后选取工业生产中常用的变频调速系统ASD(Adjustable Speed Driver)为研究对象对本文所提方法进行验证,获得ASD在不同电压暂降下的停机概率大小,为后续治理方案的确定奠定基础。

1 设备停机概率评估模型

1.1 设备停机的不确定性分析

当设备的负载率一定时,设备的电压暂降耐受能力可以用电压耐受曲线VTC(Voltage Tolerance Curve)表示^[19-20]。但当负载率不同时,设备的电压暂降耐受能力的差异较大。随着负载率 l 的增加,VTC对应的残余电压阈值 u_{th} 逐渐增大,持续时间阈值 t_{th} 逐渐减小。增加设备的负载率时,VTC的变化情况如图1所示,图中箭头表示负载率增加导致VTC的变化。当 $l=0$,即设备空载时,其最不易受扰,设备的电压暂降耐受能力最强,此时的VTC为图1中不确定区域的下边界,可用 u_{thmin} 和 t_{thmax} 表示;当 $l=1$ p.u.,即设备额定运行时,其最易受扰,设备的电压暂降耐受能力最小,此时的VTC为图1中不确定区域的上边界,可用 u_{thmax} 和 t_{thmin} 表示。因此,可将

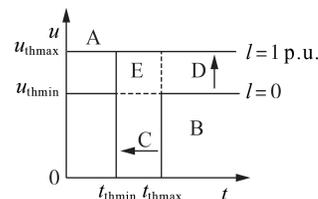


图1 设备VTC的分区

Fig.1 Partition of equipment VTC

收稿日期:2019-09-27;修回日期:2020-04-14

基金项目:中国南方电网公司科技项目(GZHKJXM20170141)

Project supported by the Science and Technology Program of China Southern Power Grid Company(GZHKJXM20170141)

残余电压-持续时间平面($u-t$ 平面)分成5个部分,分别记为A—E,残余电压、持续时间取值范围与5个分区域的对应关系如表1所示。

表1 设备VTC的分区及表达

Table 1 Partition and expression of equipment VTC

区域名称	电压暂降(u, t)范围
A	$u \geq u_{thmax}$ 或 $t < t_{thmin}$
B	$u < u_{thmin}$ 且 $t \geq t_{thmax}$
C	$u < u_{thmin}$ 且 $t_{thmin} \leq t < t_{thmax}$
D	$u_{thmin} \leq u < u_{thmax}$ 且 $t \geq t_{thmax}$
E	$u_{thmin} \leq u < u_{thmax}$ 且 $t_{thmin} \leq t < t_{thmax}$

当电压暂降的残余电压和持续时间在不同区域时,将会造成如下影响:

(1)当电压暂降(u, t)位于区域A时,无论负载率如何,设备的停机概率 $P(u, t)=0$;

(2)当电压暂降(u, t)位于区域B时,无论负载率如何,设备的停机概率 $P(u, t)=1$;

(3)当电压暂降(u, t)位于不确定区域(区域C—E)时,设备是否停机存在不确定性。

设备是否停机与设备的电压暂降耐受能力有关。在一定的负载率下,设备电压暂降耐受能力可用对应的残余电压阈值及持续时间阈值描述。当电压暂降(u, t)超过当前负载率下设备的残余电压阈值或持续时间阈值时,设备就会停机。在假设设备负载率为随机变量的前提下,结合负载率与残余电压阈值和持续时间阈值的对应关系,可用设备负载率的概率密度函数描述设备停机概率,从而建立设备停机的概率评估模型。在不同暂降类型下,设备电压暂降耐受能力不同,为简化分析计算,本文仅考虑三相暂降这一最严重的情况。

1.2 设备停机概率评估模型的推导

设备在不同负载率下的残余电压阈值和持续时间阈值都可以通过实验或仿真测试得到。假设电压暂降起始角为 0° ,设备的欠压保护阈值和负载特性及控制方式不变,通过拟合实验数据,为了更好地进行后续分析,可分别用 $l=m(u_{th})$ 和 $l=n(t_{th})$ 表示负载率 l 和残余电压阈值 u_{th} 及持续时间阈值 t_{th} 的关系。设备负载率服从一定的概率分布,概率密度函数为 $f(l)$ 。

当电压暂降(u, t)位于区域C时,设备的工作状态与其负载率有关,持续时间对设备的工作状态影响较大,而残余电压对设备的工作状态没有影响。当设备负载率大于当前持续时间 t 作为阈值对应的负载率时,设备会发生停机,因此设备的停机概率 $P(u, t)$ 可表示为:

$$P(u, t) = \int_{n(t)}^1 f(l) dl \quad (1)$$

当电压暂降(u, t)位于区域D时,设备的工作状态与其负载率有关,残余电压对设备的工作状态影响较大,而持续时间对设备的工作状态没有影响。当设备负载率大于当前残余电压 u 作为阈值对应的负载率时,设备会发生停机,因此设备的停机概率 $P(u, t)$ 可表示为:

$$P(u, t) = \int_{m(u)}^1 f(l) dl \quad (2)$$

当电压暂降(u, t)位于区域E时,设备的工作状态与其负载率有关,残余电压和持续时间均对设备影响较大。当设备负载率大于当前残余电压 u 作为阈值或持续时间 t 作为阈值对应的负载率时,设备会发生停机。在实际电力系统中,残余电压主要与故障位置和测量点有关,持续时间主要与故障切除的时间有关,因此可假设残余电压与持续时间相互独立。则设备的停机概率 $P(u, t)$ 可表示为2个独立随机概率函数的乘积:

$$P(u, t) = \int_{n(t)}^1 f(l) dl \int_{m(u)}^1 f(l) dl \quad (3)$$

综上所述,设备停机概率评估模型可总结为:

$$P(u, t) = \begin{cases} 0 & u \geq u_{thmax} \text{ 或 } t < t_{thmin} \\ \int_{n(t)}^1 f(l) dl & u < u_{thmin} \text{ 且 } t_{thmin} \leq t < t_{thmax} \\ \int_{m(u)}^1 f(l) dl & u_{thmin} \leq u < u_{thmax} \text{ 且 } t \geq t_{thmax} \\ \int_{n(t)}^1 f(l) dl \int_{m(u)}^1 f(l) dl & u_{thmin} \leq u < u_{thmax} \text{ 且 } t_{thmin} \leq t < t_{thmax} \\ 1 & u < u_{thmin} \text{ 且 } t \geq t_{thmax} \end{cases} \quad (4)$$

2 设备停机概率评估流程

利用上述概率评估模型开展设备停机概率评估的流程如下:

(1)建立电压暂降耐受能力测试平台,分别从负载率、持续时间和残余电压幅值3个维度对受测试设备进行电压暂降耐受能力测试,从而获得一簇VTC;

(2)利用不同拟合函数对不同实验结果进行拟合,并用最小二乘法进行参数计算,分别确立负载率 l 和残余电压阈值 u_{th} 及持续时间阈值 t_{th} 的关系,获得 $m(u_{th})$ 和 $n(t_{th})$;

(3)已知或假定设备负载率服从一定的概率分布,并设其概率密度函数为 $f(l)$,利用式(4)所示的设备停机概率评估模型求取不同电压暂降下的设备停机概率。

3 算例分析

本文采用安川CIMR-LB2A变频器为评估对象,

该变频器额定输出电流为25 A,选取Otis BOPM1-100L3-E1永磁同步电机作为负载,其额定功率为4.6 kW。实验测试平台见附录中图A1,平台中电能质量扰动模拟电源采用阿美特克公司的MXII-45,其最大输出功率为45 kV·A,交流电压输出范围为0~300 V,可输出三相对称电压和三相不对称电压。在测试中,当ASD在电压暂降持续或恢复过程中非正常停机,则认为ASD受到电压暂降干扰而停机。当输入电流方均根值降低至0.1 A以下且1 min内不恢复时,认为不通过测试。通过设定不同的负载率,改变电压暂降类型和电压暂降参数,可以获得一系列的测试结果。

对实验测试结果进行线性拟合,并用最小二乘法进行参数计算,相关系数 R^2 为0.9997,ASD负载率 l 与残余电压阈值 u_{th} 的变化关系如图2所示(图中 l 与 u_{th} 均为标么值,后同)。其表达式为:

$$l = m(u_{th}) = 24.652 u_{th} - 17.473 \quad (5)$$

当 $l_{max} = 1$ p.u.时, $u_{thmax} = 0.749$ p.u.;当 $l_{min} = 0$ 时, $u_{thmin} = 0.709$ p.u.。

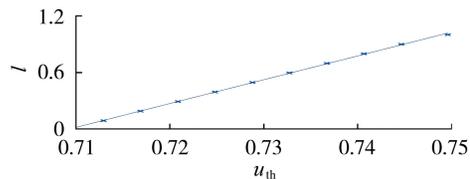


图2 负载率与残余电压阈值的关系

Fig.2 Relationship between load ratio and residual voltage threshold

同理,对实验测试结果进行指数拟合,并用最小二乘法进行参数计算,相关系数 R^2 为0.9984,可得负载率 l 与持续时间阈值 t_{th} 的变化关系如图3所示,其表达式为:

$$l = n(t_{th}) = 17.655 t_{th}^{-0.95} \quad (6)$$

当 $l_{max} = 1$ p.u.时, $t_{thmin} = 20.53$ ms;当 $l_{min} = 0$ 时, $t_{thmax} \rightarrow +\infty$ 。

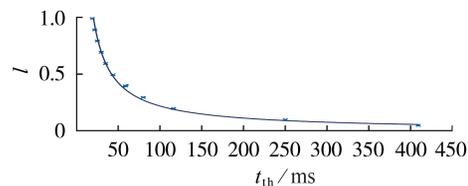


图3 负载率与持续时间阈值的关系

Fig.3 Relationship between load ratio and duration threshold

假设ASD的负载率服从 $[0, 1]$ 均匀分布,则 $f(l) = 1$ p.u.,将其与式(5)、(6)一并代入式(4),得到发生电压暂降 (u, t) 位于不同区域时设备停机概率为:

$$P(u, t) = \begin{cases} 0 & u \geq 0.749 \text{ p.u. 或 } t < 20.53 \text{ ms} \\ 1 - 17.655 t^{-0.95} & u < 0.709 \text{ p.u. 且 } t \geq 20.53 \text{ ms} \\ [1 - (24.652 u - 17.473)] (1 - 17.655 t^{-0.95}) & 0.709 \text{ p.u.} \leq u < 0.749 \text{ p.u. 且 } t \geq 20.53 \text{ ms} \end{cases} \quad (7)$$

不同电压暂降 (u, t) 下,ASD发生停机的概率如图4所示(图中 u 为标么值,后同)。

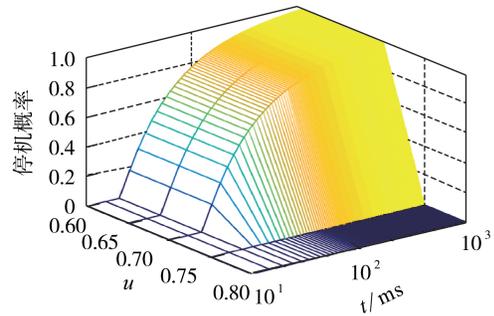


图4 ASD负载率服从均匀分布时的停机概率

Fig.4 Malfunction probability of ASD with load ratio obeying uniform distribution

假设ASD的负载率服从正态分布,负载率的均值 $l_0 = 0.5$ p.u.、方差 $\sigma^2 = \frac{1}{36}$,则负载率 l 的概率密度函数为:

$$f(l) = \frac{6}{\sqrt{2\pi}} \exp[-18(l-0.5)^2] \quad (8)$$

由此可根据式(4)计算得到不同电压暂降 (u, t) 下,ASD发生停机的概率如图5所示。

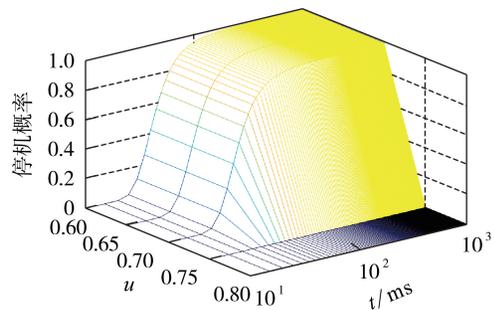


图5 ASD负载率服从正态分布时的停机概率

Fig.5 Malfunction probability of ASD with load ratio obeying normal distribution

由图4和图5可知,在电压暂降耐受能力的不确定范围内,随着残余电压的降低和持续时间的增长,设备的停机概率逐渐增大。当ASD的负载率服从不同的概率分布时,同一电压暂降下,ASD停机的概率不同。在实际中,通过实验获得设备在不同负载率下的耐受能力,通过调查统计获得设备负载率的概率分布特性,可以更准确地获得设备停机的概率评估结果。

4 结语

本文综合考虑设备在不同负载率下的耐受能力和设备负载率的概率分布特性,提出一种新的电压暂降设备停机概率评估方法。本文方法根据实际测试结果分别拟合出负载率与残余电压和持续时间阈值的映射函数关系,利用负载率的概率分布密度函数求取设备停机概率。最后以 ASD 为研究对象,验证了本文方法的有效性。本文方法的评估结果能更准确地反映电压暂降下设备停机的不确定性,为后续的治理方案决策奠定基础。

本文方法是在实际测试工作的基础上开展的,因此需要大量的实际测试工作作为支撑。除此之外,电压暂降起始角和相位跳变等特征也会影响设备电压暂降耐受能力,后续可以考虑更多的随机变量,建立更完备的停机概率评估模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会(SAC/TC 1). 电能质量 电压暂降与短时中断:GB/T 30137—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [2] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power & Energy Society. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality: IEEE Std 1159-2009 [S]. New York, USA:IEEE,2009.
- [3] International Electrotechnical Commission. ElectroMagnetic Compatibility(EMC):part 4 testing and measurement techniques—section 30:power quality measurement techniques:IEC 61000-4-30[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2014.
- [4] MILANOVIĆ J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags: part II: practical implementation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):925-932.
- [5] 丁泽俊,朱永强,陶顺. 事件型电能质量的综合评估[J]. 电网技术,2011,35(2):84-87.
DING Zejun, ZHU Yongqiang, TAO Shun. A comprehensive assessment of event-based power quality[J]. Power System Technology, 2011, 35(2):84-87.
- [6] 欧阳森,李翔,刘平,等. 低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特性试验研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):211-218.
OUYANG Sen, LI Xiang, LIU Ping, et al. Experimental research on sensitive characteristic to voltage sag for electronic circuit of low-voltage release[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):211-218.
- [7] 钟庆,吴浩波,贺哲,等. 交流接触器电压暂降非单调抗扰特性分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):112-117.
ZHONG Qing, WU Haobo, HE Zhe, et al. Analysis of non-monotonic voltage sag tolerance characteristics of AC contactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3):112-117.
- [8] 陶顺,唐松浩,陈聪,等. 变频调速器电压暂降耐受特性试验及量化方法研究 I:机理分析与试验方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6):1273-1281.
TAO Shun, TANG Songhao, CHEN Cong, et al. Experimental research on adjustable speed drivers tolerance to voltage sags and quantitative method part I: mechanism analysis and test method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):1273-1281.
- [9] 卢文清,常乾坤,贾东强,等. 设备侧电压暂降严重程度评估方法研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):175-182.
LU Wenqing, CHANG Qiankun, JIA Dongqiang, et al. Research on evaluation methods of voltage sag severity for equipment side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):175-182.
- [10] GUPTA C P, MILANOVIĆ J V. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):711-718.
- [11] KHATRI N, JAIN A, KUMAR V, et al. Voltage sag assessment with respect to sensitivity of adjustable speed drives in distributed generation environment [C]//2015 International Conference on Computer, Communication and Control(IC4). Indore, India:IEEE,2015:1-6.
- [12] 杨达,肖先勇,汪颖. 计及失效事件和严重程度不确定性的设备电压暂降失效率评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):107-111,117.
YANG Da, XIAO Xianyong, WANG Ying. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10):107-111, 117.
- [13] CHAN J Y, MILANOVIĆ J V. Methodology for assessment of financial losses due to voltage sags and short interruptions [C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, Spain:IEEE,2007:1-6.
- [14] SHEN C C, LU C N. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2):996-1002.
- [15] 吴国诚,叶樊,梁帅伟,等. 基于电压持续曲线的多次电压暂降严重程度评估方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):182-191,200.
WU Guocheng, YE Fan, LIANG Shuaiwei, et al. Evaluation method of multiple voltage sag severity based on voltage duration curves[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2):182-191, 200.
- [16] 赵泓,肖先勇,李政光,等. 敏感设备电压暂降失效率区间最大混合熵评估[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):70-75.
ZHAO Hong, XIAO Xianyong, LI Zhengguang, et al. Estimation of maximum interval hybrid entropy of sensitive equipment failure rate due to voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10):70-75.
- [17] 肖先勇,马超,杨洪耕,等. 用电压暂降严重程度和最大熵评估负荷电压暂降敏感度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(31):115-121.
XIAO Xianyong, MA Chao, YANG Honggeng, et al. Stochastic estimation of equipment sensitivity to voltage sag based on voltage sag severity index and maximum entropy principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31):115-121.
- [18] 代晓丰,陈伟坤,唐晓波,等. 交流调速装置电压暂降免疫度的仿真测试[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(5):76-80,86.
DAI Xiaofeng, CHEN Weikun, TANG Xiaobo, et al. Simulation test of voltage dip immunity of AC adjustable speed drive [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(5):76-80, 86.
- [19] CIGRE / CIREN / UIE Joint Working Group C4.110. Voltage dip immunity of equipment and installations[R]. Paris, France:CIGRE,2010.
- [20] 欧阳森,李翔,刘平,等. 低压脱扣器电子电路电压暂降敏感特

性试验研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 211-218.

OUYANG Sen, LI Xiang, LIU Ping, et al. Experimental research on sensitive characteristic to voltage sag for electronic circuit of low-voltage release[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 211-218.

作者简介:

吴国沛(1975—),男,河南南阳人,高级工程师,博士,从



吴国沛

事电力系统生产运行管理和设备管理工作
(E-mail: wuguopei@hotmail.com);

钟庆(1978—),男,江西赣州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: epqzhong@scut.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Evaluation of equipment malfunction probability considering load randomness

WU Guopei¹, XU Zhong¹, HE Qizhang², CHEN Weikun², ZHONG Qing²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Taking the uncertainty of equipment malfunction under voltage sag into account, an evaluation method of equipment malfunction probability under different voltage sags is proposed with the consideration of load randomness. VTC (Voltage Tolerance Curve) is used to analyze the uncertainty of equipment malfunction under different voltage sags, the two-dimensional space represented by residual voltage and duration is divided to different zones, and the uncertainty characteristics of equipment malfunction in different zones are obtained. An evaluation model of equipment malfunction probability is built according to the factors influencing equipment malfunction and the probability density function of equipment load ratio in different zones, and the application flowchart of probability evaluation method is given. The variable frequency speed control system commonly used in industry is taken as the evaluation object to verify the proposed method. The proposed method effectively considers voltage sag tolerance ability under load randomness and different load ratios, and can reflect the uncertainty of equipment malfunction under voltage sag more accurately.

Key words: power quality; voltage sag; malfunction probability; voltage tolerance curve

(上接第159页 continued from page 159)

Impedance measurement method and stability analysis of high-speed train-traction network

LIU Fangping¹, GE Xinglai¹, YU Siru¹, JIANG Keteng²

(1. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: During the operation of high-speed trains, low-frequency oscillations are likely to occur, which affects the stable operation of the high-speed-train traction drive system. Taking the high-speed train single-phase traction rectifier as the research object and the stability analysis of the train-network system as the research goal, based on the impedance definition model, a method for measuring the input admittance of the traction drive system and the output impedance of the network side is proposed. Through detection of the rectifier operation condition, the threshold value is determined, and then the magnitude of the real-time disturbance harmonic is adjusted. The disturbance injection device corresponding to the measurement method is designed to achieve the adjustment of the disturbance harmonic amplitude by adjusting the programmable resistance. The impedance of the train-network system is measured in the dq rotating coordinate system, the stability analysis is performed based on the measurement results, and the simulative verification is performed through MATLAB/Simulink, and the hardware-in-the-loop test verification is performed. The simulative and test results show that the time-domain operating conditions of the train-network system are consistent with the results of the stability analysis, and the effectiveness of the designed measurement method is verified.

Key words: train-network system; stability analysis; impedance measurement; stability threshold determination; harmonic parameter self-adjustment

附录：

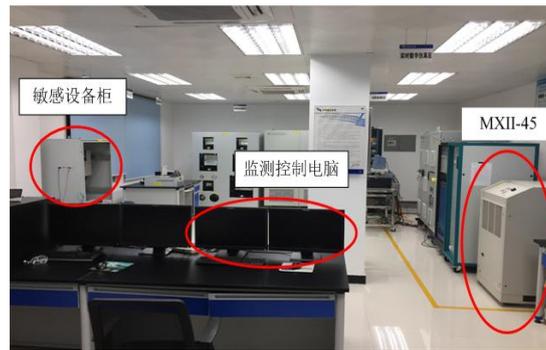


图 A1 试验测试平台示意图

Fig.A1 Schematic diagram of experiment test platform