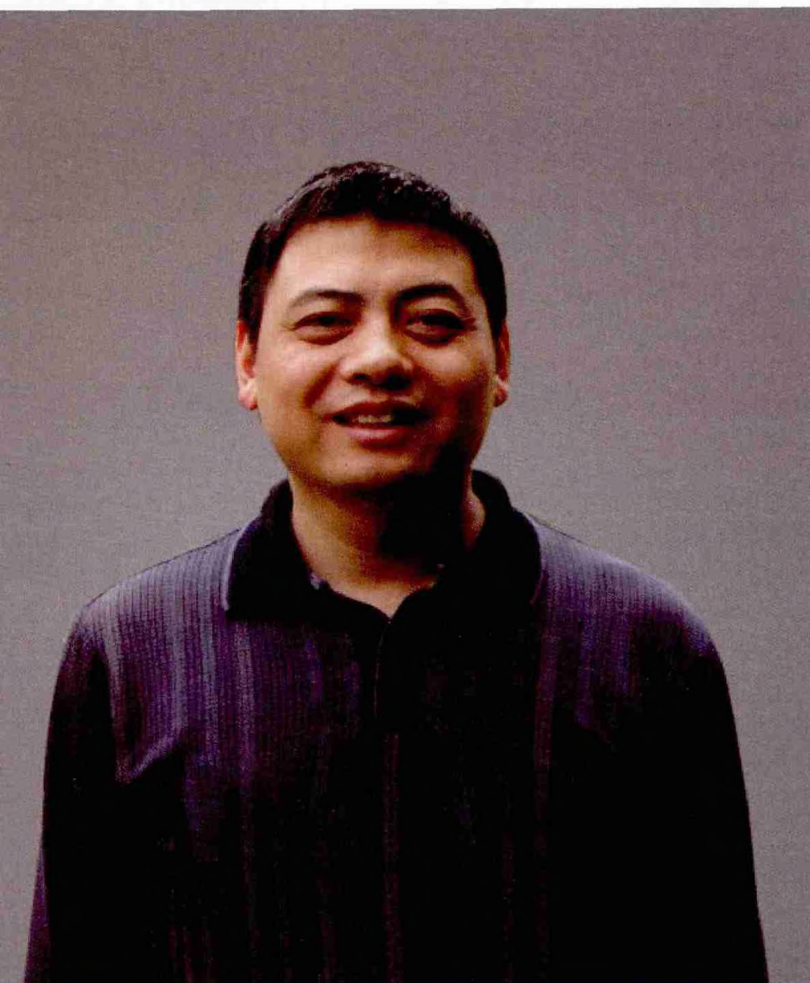


国内外电气化铁路工程供电质量标准比较

访中铁工程设计咨询集团有限公司电通院副总工程师楚振宇

■ 杨帆/本刊记者



楚振宇 教授级高工

中铁工程设计咨询集团有限公司电通院副总工程师

在接受国际标准较宽松限值要求的同时，也必然接受国际标准所要求的与时间相关的评估方法，则牵引供电系统的设计必须建立在仿真计算的基础上。

近年来我国铁路建设企业竞相走出国门参与国际铁路建设市场竞争，海外各国的社会文化背景决定了牵引供电系统设计采用以IEC为代表的国际标准，在牵引系统供电电压、变压器和电能质量等方面，国外铁路项目牵引供电系统设计与我国现行设计标准均存在一定的差异。在设计工作中国际标准与我国现行设计标准的不同给海外铁路项目电气化工程设计工作及设计方法带来了较大影响。在接受国际标准较宽松限值要求的同时，也必然接受国际标准所要求的与时间相关的评估方法，则牵引供电系统的设计必须建立在仿真计算的基础上。为了对国内外电气化铁路工程供电质量标准有进一步的了解，本刊记者特别采访了中铁工程设计咨询集团有限公司电通院副总工程师楚振宇，请他就相关问题予以解答。

国内外牵引系统供电电压标准

电气应用：楚总，您好！非常感谢您在百忙之中接受本刊的专访。首先请您简单介绍一下目前国内外牵引供电相关电气标准的概况。

楚振宇：目前我国海外铁路工程项目主要集中在美洲、非洲和亚洲等一些不发达国家，这些国家工业体系总体不完善，电气产品依靠进口。社会文化背景决定了这些国家在工程建设中对国际标准更为熟知也更为认可，在部分项目合同中甚至罗列了电气化所必须遵照的以IEC标准为主的标准清单。

在海外工程中经常碰到的主要标准有IEC标准、EN标准以及少数UIC标准。IEC是世界上成立最早的非政府性国际电工标准化机构，是联合国经社理事会（ECOSOC）的甲级咨询组织。目前IEC成员国包括了绝大多数国家，涵盖全球80%以上的人口，全球制造、使用的电气电子产品的90%遵守IEC标准。EN标准即欧盟标准，由CENELEC（1976年成立于比利时布鲁塞尔，旨

在协调欧洲有关国家的标准机构所颁布的电工标准和消除贸易上的技术障碍)发布,根据欧盟机制EN标准被赋予其成员国的有关国家标准的合法地位。德国、法国为代表的欧洲国家在电气化铁路方面进行了多年研究,EN标准的内容非常深入细致。UIC标准是国际铁路协会标准,关于电气化铁路的内容较少。从近年来各体系标准修订的过程来看,IEC标准、UIC标准向EN标准靠拢并一致的趋势非常明显。

为了让中国企业积极参与广阔的市场竞争,1989年4月1日颁布实施的《中华人民共和国标准化法》第四条规定:“国家鼓励积极采用国际标准”。此后我国电气行业标准总体上向IEC标准靠拢,近年来这种趋势日益明显。根据这两年来我们与国外铁路和电力部门的交流,海外项目牵引供电系统在牵引系统供电电压、变压器容量确定及电能质量等标准方面与国内显著不同,对项目的设计和实施产生了较大的影响。

电气应用: 请问国内外牵引系统供电电压标准都有哪些?

楚振宇: 国内外牵引系统供电电压标准相关内容如下。

1. 国际牵引系统供电电压标准

1988年,IEC发布了IEC 850《牵引系统供电电压》。2000年IEC出版了牵引系统供电电压第二版60850—2000,内容基本维持不变。其中电力牵引的标称电压值和接触网允许电压波动限值如表1所示。

表1 电力牵引的标称电压值和接触网允许电压波动限值
(单位: V)

标称电压值	瞬时最小值 $U_{\min 2}$	最低值 $U_{\min 1}$	最高值 $U_{\max 1}$	瞬时最大值 $U_{\max 2}$
25 000	17 500	19 000	27 500	29 000

其中,瞬时最小值指的是在牵引供电系统因故障或越区供电时可能出现的持续时间不大于10 min的电压最小值;瞬时最大值指的是在牵引供电系统因改变运行方式或电网电压波动时可能出现的持续时间不大于5 min的电压最大值。

2004年EN 50163修订发布后,2007年IEC基于EN 50163修订发布了第三版IEC 60850—2007,在前言中明确说明采用EN 50163—2004,其中对牵引系统供电电压的评估较以往相比更为严格。

如IEC 60850—2007第三版中规定:①电压在 $U_{\min 1}$ 和 $U_{\min 2}$ 之间的持续时间不超过2 min;②电压在 $U_{\max 1}$ 和 $U_{\max 2}$ 之间的持续时间不超过5 min;③变电所母线空载

电压不小于或等于 $U_{\max 2}$;④正常运行条件下,电压位于 $U_{\min 1} \leq U \leq U_{\max 2}$;⑤在非正常运行条件下,电压位于 $U_{\min 2} \leq U \leq U_{\min 1}$ 时不应造成任何损坏和故障(注1 列车功率限制装置的使用可能限制接触网低电压的出现);⑥如果电压达到 $U_{\max 1}$ 和 $U_{\max 2}$ 之间,应降低到低于或等于 $U_{\max 1}$ 、 $U_{\max 1}$ 和 $U_{\max 2}$ 之间的电压仅在非永久条件下出现,再生制动,调压系统如机械开关的运动;⑦最低运行电压,在非正常运行条件下, $U_{\min 2}$ 是满足机车运行的接触网电压的最低限值。

国际铁路联盟UIC在2003年发布了UIC 600《带架空接触网的电力牵引》,供电电压的波动范围取值与IEC 60850—2000、GB 1402—1998相同(见表1),但是对于各种电压取值并没有提出时间要求。

2. 国内牵引系统供电电压标准

1998年我国首次制定国标GB 1402《铁道干线电力牵引交流电压》时,等效采用了IEC 850—1988《牵引系统供电电压》,并参照了EN 50163—1995和国际铁路UIC 600—1994的有关规定,针对我国的实际情况仅保留了标称频率50 Hz、标称电压25 000 V的相关内容,其中电力牵引的标称电压值和接触网允许电压波动限值与表1相同。GB 1402在2010修订时,基本上等效采用了IEC 60850—2007,对牵引系统供电电压的评估方法相同。

2011年我国基于IEC 62313—2009发布了GB/T 28027—2011《轨道交通供电系统和机车车辆运行匹配》,提出了机车/动车组牵引单元和地面供电装置之间的供电接口定义和供电质量要求,其中8.3条提出了受电弓处平均有效电压的最小值为:交流传动列车22.5 kV,直流传动列车22.0 kV。动车组受电弓达到22.5 kV及以上时,动车组才能发挥最佳性能。

我国160 km/h及以下铁路牵引供电系统设计主要参照TB 10009—2005《铁路电力牵引供电设计规范》。其中3.2.9条规定:铁道干线电力牵引变电所牵引母线上的额定电压为27.5 kV,电力机车、电动车组受电弓和接触网的额定电压25 kV,最高电压为29 kV;电力机车、电动车组受电弓上最低工作电压为20 kV;电力机车、电动车组在供电系统非正常情况下(检修或事故)运行时,受电弓的电压不得低于19 kV。而2009年发布的、适用于高速铁路和客运专线的TB10621—2009《高速铁路设计规范(试行)》11.2.3条规定:接触网的标称电压为25 kV,长期最高电压为27.5 kV;短时(5 min)最高电压为29 kV;设计最低工作电压为20 kV。

显然,TB10009—2005在修订过程中并未考虑GB

1402—1998的规定,在最低电压方面,TB要比GB严格,而在最高电压方面,根据我国个别地区电网薄弱、接触网电压在空载时可能高于29 kV的实际国情,满足GB 1402则需大面积采用价格较高的有载调压变压器,因而未引入GB 1402—1998。而TB10621则向GB 1402—1998靠拢。

电气应用:通过您对以上标准的描述,我们对国内外牵引系统供电电压标准有了进一步的了解,那么对比以上标准,在低电压、高电压和评估方法方面有何不同呢?

楚振宇:以上标准相比,在最低电压方面,TB10009—2005要求正常运行时电压水平不能低于20 kV,非正常运行时电压水平不能低于19 kV,因此最为严格。而IEC 60850、UIC 600规定允许短时出现的最低电压为17.5~19 kV,因此采用国际标准在最低电压方面对供电系统的设计比较有利,供电臂可以根据项目线路、机车和运输组织等实际条件加以延长,从而减少牵引变电所数量。

在最高电压方面,国内普速铁路设计标准允许出现29 kV长期运行,实际运行也确实如此。而高铁设计标准要求变电所母线高于27.5 kV的时间为5 min,初步呈现通过GB向IEC标准靠拢的趋势。

在评估方法上,IEC 60850在电压水平的评估标准上从一开始就引入了时间的概念,随着版本的更新,这种评估标准越发细致严格。国内常规设计方法无法满足IEC 60850的要求。因此海外工程牵引供电系统的设计必须建立在牵引供电仿真的基础上。

牵引变压器的相关国内外标准

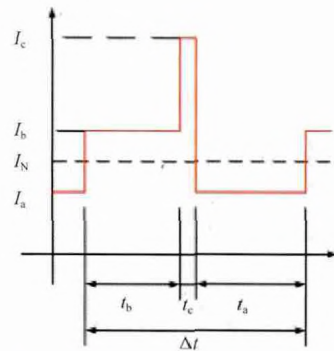
电气应用:请问牵引变压器的相关国内外标准有哪些?过负荷能力如何?

楚振宇:电力变压器国家标准GB 1094系列自1996起基本等效采用了IEC 60076变压器系列标准,除了在绝缘、试验方法等个别方面有所区别外,大部分内容是等效一致。对于安装在变电所内的牵引变压器,GB和IEC并无单独的标准。欧盟2004年发布了EN 50329《铁路应用牵引变压器》,在前言中说明基本遵照EN 60076,后者等效IEC 60076系列,不同之处在于对变压器过负荷能力进行了细化。

TB/T 3159—2007《电气化铁路牵引变压器技术条件》在前言里指出参照IEC 60076,而在过负荷能力和短路阻抗百分比等方面与国外标准不同。

电气应用:国内外牵引变压器相关标准对过负荷和能力的要求如何?

楚振宇:国内外变压器标准均要求变压器具有一定的应急过负荷能力,并给出了基于绝缘材料寿命损失的计算方法。鉴于牵引负荷剧烈波动的特点,EN 50329和TB/T 3159都对变压器过载能力给出了三阶负荷曲线,所不同的是EN 50329推荐了几种不同线路下变压器的过负荷曲线,而TB/T 3159更是在过负荷能力基础上给出了日负荷曲线,如图1和图2所示。



负荷等级	标识	额定电流倍数	持续时间
VI	a	0.823	持续
	b	1.234	2 h
	c	2.468	60 s
IXA	a	0.785	持续
	b	1.177	2 h
	c	2.235	300 s
IXB	a	0.658	持续
	b	1.315	2 h
	c	1.937	300 s

图1 EN 50329推荐的几种干线铁路变压器温升试验用负荷曲线

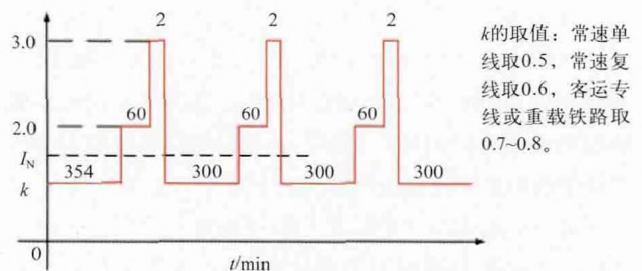


图2 TB/T 3159—2007中推荐的牵引变压器典型负荷曲线

分析图1和图2可知, EN 50329在长期过负荷的要求上, 基本与普通电力变压器相当, 最大才1.315倍, 只是增加了短时过负荷的要求; 而受到我国按照变压器安装容量收取高额基本电费制度的影响, TB/T 3159对变压器过负荷能力的要求非常严格, 2倍过负荷长达1 h (实际工程中还有2 h的要求), 短时过负荷能力更是提高到了3倍。遵照TB/T 3159能有效降低牵引变压器的安装容量, 但其设计难度、制造成本和价格都远高于同等容量的电力变压器。

电气应用: 请简述国内外牵引变压器相关标准对过短路阻抗的要求都有哪些?

楚振宇: GB 1094.5变压器承受短路的能力在2003年修订时等效采用了IEC 60076-5—2000, 其中对短路阻抗的要求如下表所示。

表 GB 1094-5—2003和IEC 60076-5—2000规定的 $U_k\%$

额定容量/kV·A	最小短路阻抗电压 ($U_k\%$)
6 301~25 000	8
25 001~40 000	10
40 001~63 000	11
63 001~100 000	12.5

TB/T 3159-2007《电气化铁路牵引变压器技术条件》5.2.6对短路阻抗的要求为: 110 kV级牵引变压器的短路阻抗一般为8.4%或10.5%; 220 kV级牵引变压器的短路阻抗一般为12%~14%。显然, 采用TB/T 3159能降低短路电流, 提高变压器抗短路冲击能力。

电气化铁路电能质量问题及相关标准

电气应用: 国内外电能质量标准都有哪些? 这些标准对电气化铁路建设中的影响有哪些?

楚振宇: 国内外电能质量相关标准如下。

1. 国内电能质量标准

目前我国电能质量标准包括全国电压电流等级和频率标准化技术委员会 (TC1) 制定的电能质量系列和全国电磁兼容标准化技术委员会 (TC246) 制定的电磁兼容标准系列。

其中电能质量标准包括: GB 12325《供电电压偏差》、GB 15945《电力系统频率偏差》、GB 15543《三相电压不平衡》、GB 12326《电压波动和闪变》、

GB 14549《公用电网谐波》和GB 18481《暂时过电压和瞬态过电压》。

电磁兼容系列标准涵盖了公用供电系统中可能出现骚扰的形成机理、形式和传导规律, 规定了骚扰度, 还提出了兼容水平, 它主要是用来协调供电电源和用户设备的发射和抗扰度的参考值, 以保证整个系统的 (包括电源和所连接的用户设备) 电磁兼容性, 涉及到电磁环境、发射限值、抗扰度、试验程序和测量技术等内容。我国电磁兼容系列标准自制定起就确定了向IEC标准靠拢的原则, 目前已经发布的标准包括: GB 17624 (对应IEC 61000-1综述系列)、GB 17625 (对应IEC 61000-3限值系列)、GB 17626 (对应IEC 61000-4试验与测量系列)、GB 17799 (对应IEC 61000-6通用标准系列) 和GB 18039 (对应IEC 61000-2环境系列)。

以上标准中, GB 14549《公用电网谐波》总畸变率2%的限制要求曾引起铁路部门和电力部门长期争议, GB/Z 17625采用IEC标准谐波发射限值3%又引起国内对IEC文件 (标准还是技术报告) 的有效性的争议, 直到近年来交直交型电力机车和电动车组开始普及后才逐渐平息。

2. 电能质量国际标准

伴随电能质量标准的一些争议, 以IEC 61000系列为代表的电能质量国际标准很早进入了国人的视野。目前基本形成的共识是, 在电能质量限值方面, 无论是IEC 61000系列标准 (和技术报告) 还是IEEE std519, 在谐波方面比国内电能质量标准宽松, 在其他等方面与国内基本一致; 而在测试方法、测试取值等方面, IEC 61000系列与电能质量国标尚存在细微差异。

3. 海外项目电能质量标准

电气化铁路带来的电能质量问题由来已久, 世界各国都非常重视。尽管国内对谐波限值、IEC电磁兼容标准的效力等一直存在争议, 但在国外, 多数电力部门谈及电能质量时都直言采用IEC系列标准以及IEEE std519, 许多项目合同里也明确规定了采用IEC 61000系列标准, IEC标准的国际权威性已经到了不容置疑的地步。虽然采用电能质量国际标准比国内标准要宽松有利, 但在国际项目中应采用先进的交直交型电力机车和电动车组以避免产生电能质量问题。

随着我国高速铁路在世界的影响越来越大, 我们只有了解、掌握和运用国际标准, 才能在海外国际铁路市场的竞争中取胜。EA