

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.017

油浸式非晶合金配电变压器过载能力核算方法研究

文正其¹, 卢文华¹, 杜振波¹, 向冬冬¹, 李建超²

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 2. 河北钢铁集团邯钢公司, 河北 邯郸 056015)

摘要: 针对非晶合金配电变压器因过载导致烧损的情况, 提出了一种油浸式非晶合金配电变压器过载能力校核方法。该方法以油浸式电力变压器负载导则为依据, 确定了过载特定限制条件及过负荷校核流程, 建立了从能量守恒角度研究了基于顶层油道油温的绕组热点温度预估模型。最后以一台 SBH15 系列非晶合金变压器为例, 分别利用文中提出的热点温度预测模型和负载导则推荐的模型开展过载能力校核, 结果表明, 文中提供的方法对过载能力的考核更为严格。

关键词: 非晶合金变压器; 过负荷; 热点温度

Overload Capability Calculation for Oil-immersed Amorphous Alloy Transformers

WEN Zhengqi¹, LU Wenhua¹, DU Zhenbo¹, XIANG Dongdong¹, LI Jianchao²

(1. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan NARI Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

2. Handan Iron and Steel Company, Hebei Iron and Steel Group, Hebei Handan 056015, China)

Abstract: Aiming at amorphous alloy distribution transformer burnt fault due to overload, a new overload capability calculation method for oil-immersed amorphous alloy distribution transformer is proposed. Based on the oil-immersed power transformer load guide, the specific overload restrictions and the process of overload capability calculation are determined. And a new hot spot temperature prediction model is established on the basis of the top duct oil temperature following energy conservation. Finally, a SBH15 series amorphous alloy transformer is taken as an example to calculate the overload capability with the proposed hot spot temperature prediction model and the model suggested in the oil-immersed power transformer load guide, respectively. The results indicate that the proposed model can obtain more stringent overload capability criterion than the other.

Key words: amorphous alloy transformer; overload; hot spot temperature

0 引言

非晶合金配电变压器是一种新型节能环保型变压器, 具有低空载损耗特性, 据统计油浸式非晶合金配电变压器各容量等级的空载损耗值仅为常规配电变压器的 70% 左右^[1-5]。从理论上来说, 非晶合金配电变压器过载能力要强于常规配电变压器, 但因设计、工艺及运行管理等原因使得早期运行的非晶合金配电变压器(如 SH11 型)的过载能力还不如同类规格的常规硅钢片变压器^[6-7], 而且非晶合金铁心在高温和过激磁的情况下, 导磁性能会发生不

可恢复的损坏, 因此有必要研究非晶合金配电变压器的过载能力核算方法, 为其日常负载控制提供参考, 保证变压器安全可靠运行。

文[8]通过对额定容量下与 1.5 倍额定容量下高过载配电变压器的温升试验结果进行比较, 验证了过载情况下温升存在明显增长, 并提出了自动调容、加装风机和采用新型高过载配电变压器等过载治理措施; 文[9-10]提出了包括环境温度、起始负荷、过负荷倍数、油温及热点温度等参数形成的核算边界条件和过载限值的建议; 文[11]利用负载导则中的热点温度估算模型和寿命损失模型分析了 SNBH-315/10 非晶合金农用变压器的不同负载情

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-04-24

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(WNZ141-0012)。

Project Supported by Science and Technology Fund of SGCC(WNZ141-0012).

况下的热点温升和寿命损失。但研究表明变压器过载时绕组冷却油道油温能迅速跟随绕组温度增长, 导致过载暂态情况下顶层油道油温比顶层油温高, 因此, 基于顶层油温估算过载情况下的绕组热点温度会低于实际值^[2], 影响了变压器的过载能力评估的正确性。

笔者根据相关规程标准提出了非晶合金配电变压器过载特定限制条件和核算模型, 结合环境温度、变压器特性参数、负载率等从能量守恒角度建立基于顶层油道油温的绕组热点温度预测模型, 并给出非晶合金配电变压器在不同过载情况下可安全持续运行的时间。

1 非晶合金配电变压器过载能力计算

1.1 过载特定限制条件

变压器过载或环境温度高于设计环境温度时, 变压器将遭受一定程度的危险, 加速绝缘老化。如绕组、引线、绝缘材料及油的温度将会升高, 且有可能达到不可接受的程度等^[13-14]。文中将油浸式非晶合金配电变压器的电流和温度限制同样按照 GB 1094—2008 负载导则中的规定执行, 将过载时的负荷分为正常周期性、长期急救周期性及短期急救 3 种类型, 并规定不同类型下温度的限制。配电变压器超铭牌额定值时负载的电流和温度限值见表 1。表 1 中未规定短期急救负载的顶层油温和热点温度限值, 这是因为要在配电变压器上控制急救负载的持续时间, 通常是不现实的。

表 1 配电变压器超铭牌额定值时负载的电流和温度限值
Table 1 Distribution transformer nameplate rating over load current and temperature limits

负载类型	正常周期性	长期急救周期性	短期急救
负载电流限值 $I/p.u.$	1.5	1.8	2.0
绕组热点温度/°C	120	140	—
顶层油温/°C	105	115	—

1.2 过载能力核算方法

文[9]中提出了 500 kV 油浸式电力变压器过载能力核算方法, 从到达顶层油温限值时间、绕组温度限值时间以及附件允许过载时间 3 方面进行校核, 见图 1。依据环境温度、负载率及变压器特性参数等建立顶层油温和热点温度预测模型, 并将预测结果和温度限制相比较, 达到限值前的持续时间为允许过载时间。基于此思路, 笔者从能量守恒角度建立基于顶层油道油温的绕组热点温度预测模型, 分析油浸式非晶合金配电变压器过载能力。因附件允许过载时间一般需要厂家提供具体试验数

据, 仅通过负载率、环境温度等实时数据难以准确核算, 因此文中仅从顶层油温和绕组热点温度方面进行校核。

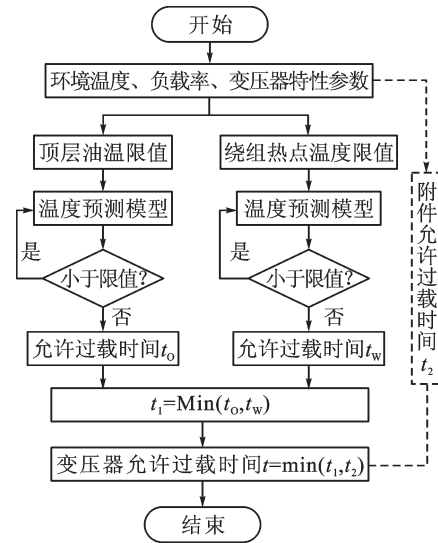


图 1 非晶合金配电变压器过载能力核算流程

Fig. 1 Amorphous alloy distribution transformer overload accounting processes

2 热点温度估算模型

在导则 IEC 60076 -7—2005 和 IEEE Std C57.91—1995 中, 热点温度构成见式(1), 由环境温度 T_A 、顶层油温对环境温度的温升 ΔT_{TO} 及热点温度对顶层油温的温升 $\Delta T_{HS/TO}$ 3 部分组成。

$$T_{HS} = T_A + \Delta T_{TO} + \Delta T_{HS/TO} \quad (1)$$

但在变压器过载运行时因冷却油道油温与顶层温升存在一定的时间差, 导致基于顶层油温推导的绕组热点温度会低于实际值, 从而引起变压器超限运行等不良情况发生, 而在过载情况下, 绕组油道油温能在一定时间内迅速升高, 这个时间近似绕组时间常数^[15]。针对以上情况, 文中研究基于顶层油道油温的热点温度估算模型, 并将热点温度模型分为底层油温等 4 个部分组成见式(2)。

$$T_{HS} = T_A + \Delta T_{BO} + \Delta T_{WO} + \Delta T_{HS/WO} \quad (2)$$

式(2)中: T_A 为环境温度; ΔT_{BO} 为底层油温对环境温度的温升; ΔT_{WO} 为绕组热点处油道油温对底层油温的温升; $T_{HS/WO}$ 为绕组热点温度对绕组热点处油道油温的温升, 将有效解决油道油温和顶层油温的时间差问题。以上温度梯度的计算采用基于热平衡方程和热吸收原理如方程组(3)进行推导。

$$\begin{cases} Q_{GEN} = Q_{ABS} + Q_{LOST} \\ Q_{ABS} = MC_p \Delta T \end{cases} \quad (3)$$

方程组(3)中: Q_{GEN} 为热源产生的热量; Q_{ABS} 为热源自吸收的热量; Q_{LOST} 为冷却介质吸收的热量; M

为热源质量; C_p 为热源比热容; ΔT 为热源温度变化量。具体计算模型参见文[12]中的附录 G 部分。因油粘度和温度密切相关,其关系见式(4),其中 θ_{oil} 为顶层油温。

$$\mu = 1.357 \times 10^{-6} \cdot e^{\left(\frac{2.7973}{\theta_{oil} + 273}\right)} \quad (4)$$

对变压器而言,内部热源包括铁耗、铜耗、附加

损耗(漏磁损耗、杂散损耗等)。热量传递形式为绕组和铁心内部的热量先以传导的形式传递到表面,再通过对流散发到变压器油中,并形成自然循环(或在外力推动下),加速热量从变压器油传给油箱和散热器,最后通过对流和辐射形式散到空气中。通过该方法估算热点温度需要的参数见表 2。

表 2 基于顶层油道油温的热点温度估算模型需要的参数

Table 2 Distribution transformer nameplate rating over load current and temperature limits

参数名称	符合	参数名称	符合
铜耗	P_W	额定负荷下顶层油温升	$\Delta\theta_{TO,R}$
绕组涡流损耗	P_E	额定条件下底层油温升	$\Delta\theta_{BO,R}$
杂散损耗	P_S	额定条件下环境温度	$\theta_{A,R}$
铁耗	P_C	绕组导体类型	WDG_MAT
冷却方式	COOL_TYPE	绕组时间常数	t_W
额定容量	MVA	铁心和绕组重量	M_{CC}
绕组平均温升限值	$\Delta\theta_{AW,G}$	油箱与附件重量	M_{TANK}
额定负荷下绕组平均温升	$\Delta\theta_{AW,R}$	绝缘油类型	OIL_TYPE
额定负荷下绕组热点温升	$\Delta\theta_{HS,R}$	油重	M_{oil}

其中对于配电变压器而言,负载损耗中主要是绕组和引线的直流电阻损耗,漏磁场引起的附加损耗很小,可以忽略^[6],即可以取 $P_E=0, P_S=0$ 。油浸式非晶合金配电变压器冷却方式主要为油浸自冷 ONAN (oil natural air natural) 类型,主要通过“虹吸”效应实现油循环,导致油流速度较慢,引起顶层油温和底层油温、绕组温度和油温度存在较大温差。

利用一台 SBH15 系列油浸式非晶配电变压器(额定容量:200 kVA; 电压比 $10 \pm 2 \times 2.5\% / 0.4$ kV; 冷却方式:ONAN),在绕组切入光纤传感器监测绕组热点温度,并选取所测量的绕组最高温度作为绕组热点温度^[7]。在冷启动和环境温度为 -10 °C 条件下,以 1.1 倍额定电流持续运行 11.75 h,通过对文中研究的热点估算模型(A.G)、负载导则推荐的方法(C.7)预测热点温度和实测热点温度进行比较,见图 2。从图 2 中可以看出,A.G 预估算法因冷启动原因,在前 3 h 之前存在一定误差情况下,后一段时间计算值和实测值达到了较高的吻合度,比 C.7 预估算法更接近实测温度,因此,在过载情况下该模型计算的热点温度有较高的准确度。通过测试该变压器热点位于 C 相高压绕组上第 2 个线饼和第 3 个线饼之间,与文[17-19]基本一致。

3 实例应用

文中以单台 SBH15 系列非晶合金变压器(额定容量:200 kVA; 电压比 $10 \pm 2 \times 2.5\% / 0.4$ kV)为例,详细参数见表 3,利用文中提出的方法进行过载能力

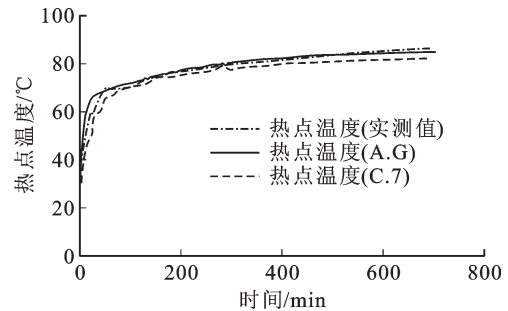


图 2 模型估算值和实测值比较

Fig. 2 Comparison of model calculations and measured values

核算,假定环境温度为 20 °C。

利用 VBA 对文中研究的热点估算模型(A.G)和负载导则推荐的方法(C.7)进行编程验证,结果见图 3、4,尽管 A.G 和 C.7 两种方法的原理不同,但在额定负载以下运行时,两者的计算结果基本一致,当变压器过载运行时,该模型计算的热点温度值高于负载导则值 5 °C 左右(负载率 $k=1.3$ 情况下,负载率指实际功率与额定功率的比值),因此使用 A.G 热点估算方法对于负载能力的校核将更为严格。

依据文中设计的过负载能力校核流程,在起始负载率(0.6 和 0.8 倍额定负载)、过负荷倍数(1.5 和 1.8 倍额定负载)及环境温度为 20 °C 的情况下,分别采用 A.G 和 C.7 校核算法对该变压器进行过负载能力校核,校核结果见表 4(环境温度:20 °C)。从表 4 中可以得出以下结论:①过载情况下,热点温度往往先于顶层油温到达导则规定的温度限值;②因油

表 3 与SBH15型非晶合金变压器负载能力相关的举例参数
Table 3 With SBH15-type amorphous alloy transformer load capacity related parameters

文中模型参量	值	负载导则模型参量	值
$\Delta\theta_{TO,R}/^{\circ}\text{C}$	60	$\Delta\theta_{TO,R}/^{\circ}\text{C}$	60
$\Delta\theta_{HS,R}/^{\circ}\text{C}$	78	$\Delta\theta_{HS,R}/^{\circ}\text{C}$	78
$\Delta\theta_{BO,R}/^{\circ}\text{C}$	38	R	33.62
$\Delta\theta_{AW,R}/^{\circ}\text{C}$	63	t_0/min	180
P_w/W	2 730	t_w/min	4
P_c/W	120	M_{CC}/kg	1 301.8
COOL_TYPE	ONAN	M_{TANK}/kg	662
WDG_MAT	铜	OIL_TYPE	ONAN
t_w/min	4	M_{OIL}/kg	245
M_{CC}/kg	1 301.8	$\theta_{A,R}/^{\circ}\text{C}$	20
M_{TANK}/kg	662	油指数 x	0.8
OIL_TYPE	25号油	绕组指数 y	1.6
M_{OIL}/kg	245	导体比热容 C	390
$\theta_{A,R}/^{\circ}\text{C}$	20	—	—

注: R 为损耗比; t_0 为油时间常数。

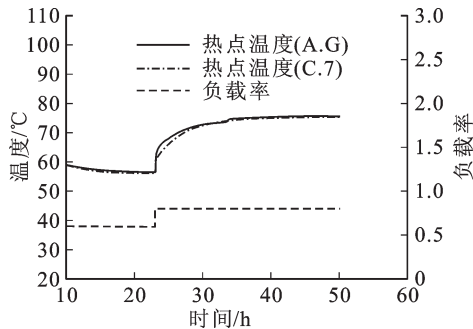


图 3 正常负载下变压器热点温度计算

Fig. 3 Hot spot temperature calculation at normal load

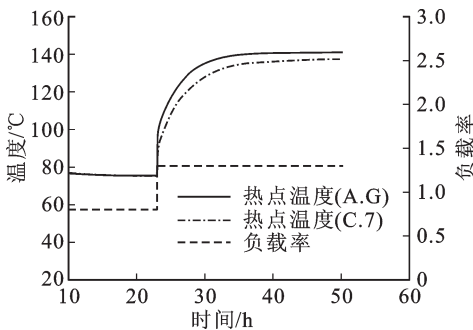


图 4 1.3 倍过载情况下变压器热点温度的计算

Fig. 4 Hot temperatures calculation at 1.3 p.u. load

道油温对绕组温度更为敏感, 因此过载情况下 A.G 算法估算的热点温度更快速接近限值温度, 因此其过载允许时间较 C.7 校核算法明显更为严格; ③过载允许时间和初始负载率相关, 近似二次函数关系, 初始负载率越高, 过载允许时间越低, 具体情况见图 5(环境温度: 20 °C)。

表 4 非晶合金配电变压器过载能力评估结果
Table 4 The result of amorphous distribution transformer overload assessment

参数	A.G				C.7			
	0.6		0.8		0.6		0.8	
初始负载率	0.6		0.8		0.6		0.8	
过负荷倍数	1.5	1.8	1.5	1.8	1.5	1.8	1.5	1.8
t_0/min	195.5	128.0	160.0	106.5	281.5	200.5	233.5	168.0
t_w/min	72.5	49.0	37.5	27.0	152.0	123.0	104.0	90.5
允许时间/min	72.5	49.0	37.5	27.0	152.0	123.0	104.0	90.5

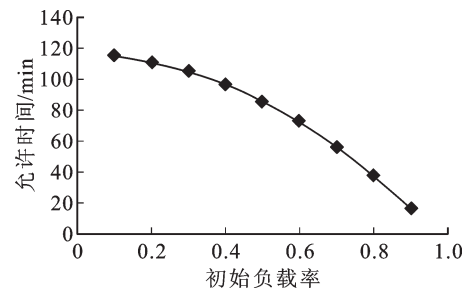


图 5 初始负载率与允许时间关系

Fig. 5 The relationship between the initial load and guaranteed time

4 结论

针对非晶合金配电变压器因过载导致烧损等情况, 文中建立了油浸式非晶合配电变压器过负荷能力校核模型, 结论如下:

1) 依据负载导则等标准规程确立了非晶合金配电变压器过载特定限制条件, 在此条件下提出了过载能力校核流程, 通过计算变压器过载允许运行时间指标, 能有效反映设备的过负荷能力, 为配电变压器的负荷控制、增容等决策提供科学支撑;

2) 通过对一台 10 kV 的 SBH15 系列非晶合金配电变压器的过负荷能力进行分析可知, 因油道油温对绕组温度更为敏感, 过载情况下文中采用的算法(A.G 算法)估算的热点温度更快速接近限值温度, 因此其过载允许时间较 C.7 校核算法更为严格;

3) 通过对不同初始负载率情况下进行分析, 过载允许时间和初始负载率相关, 近似二次函数关系, 初始负载率越高, 过载允许时间越低;

4) 在今后的相关研究中, 进一步完善热点温度估算的同时, 应综合考虑套管、分接开关等组件对过负荷的承受能力校核的影响。

参考文献:

- [1] 杨中地,武颖. 非晶合金变压器[J]. 变压器,2007,44(7):1-8.
YANG Zhongde,WU Ying. Transformer with amorphous core[J]. Transformer,2007,44(7):1-8.
- [2] 刘道生. 我国非晶合金变压器技术调研分析报告[J]. 电气制造,2012(2):30-35.
LIU Daosheng. Amorphous alloy transformer technology research and analysis report in China[J]. Electrical Manufacturing,2012(2):30-35.
- [3] 何顺姬. 非晶合金铁心变压器与S11型变压器比较[J]. 广东电力,2008,21(12):29-31.
HE Shunji. Comparison between amorphous alloy core transformers and S11 transformers[J]. Guangdong Electric Power,2008,21(12):29-31.
- [4] 王金丽,盛万兴,杨红磊,等. 非晶合金配电变压器的技术性能分析[J]. 电网技术,2010,34(10):32-37.
WANG Jinli,SHENG Wanxing,YANG Honglei,et al. Analysis on technical performance of amorphous core distribution transformer[J]. Power System Technology,2010,34(10):32-37.
- [5] Q/GDW 463—2010 非晶合金铁心配电变压器选用导则[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
Q/GDW 463—2010 The guide for choice amorphous alloy core distribution transformer[S]. Beijing:China Electric Power Press,2010.
- [6] 朱文炜,李刚,刘刚. 宁夏电网非晶合金变压器运行情况[J]. 宁夏电力,2012(3):36-39.
ZHU Wenwei,LI Gang,LIU Gang. Operation condition analysis of amorphous alloy transformer in ningxia power grid[J]. Ningxia Electric Power,2012(3):36-39.
- [7] 吴鹏,陆云才,陈铭明,等. 江苏电网非晶合金变压器综合评估[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):1-5.
WU Peng,LU Yuncai,CHEN Mingming,et al. Comprehensive evaluation of amorphous alloy transformer on Jiangsu power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013,32(3):1-5.
- [8] 王琦,付超,王欣盛,等. 配电变压器过负荷能力分析 & 治理措施研究[J]. 陕西电力,2014,42(6):69-72.
WANG Qi,FU Chao,WANG Xinsheng,et al. Study on overload capacity analysis and treatment measures of distribution transformer[J]. Shaanxi Electric Power,2014,42(6):69-72.
- [9] 陈晴,吴国忠,孙翔. 提高500 kV大型变压器过载能力的研究[J]. 机电工程,2010,27(12):94-97.
CHEN Qing,WU Guozhong,SUN Xiang. Research of 500 kV high-capacity transformer's overload capacity improvement[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine,2010,27(12):94-97.
- [10] 敖明,杨伟龙. 油浸式电力变压器过载限值分析[J]. 吉林电力,2005(2):35-36.
AO Ming,YANG Weilong. Analysis on limited value by overload for oil-filled transformer[J]. Jilin Electric Power,2005(2):35-36.
- [11] 刘道生. 非晶合金农用变压器的研究[J]. 电气制造,2012(9):48-53.
LIU Daosheng. Study of amorphous alloy transformer of rural transformer[J]. Electrical Manufacture,2012(9):48-53.
- [12] IEEE Std C57.91—1995(R2004) IEEE guide for loading mineral-oil-immersed transformers[S].2004.
- [13] GB/T 1094.7—2008 电力变压器第7部分油浸式电力变压器负载导则[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
GB/T 1094.7—2008 Power transformers-Part 7:Loading guide for oil-immersed power transformers[J]. Beijing:China Standard Press,2009.
- [14] GB 1094.2—2013 电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
GB 1094.2—2013 Power transformers-Part 2:Temperature rise for liquor-immersed transformer[S]. Beijing: China Standard Press,2013.
- [15] PIERCE L W. Predicting liquid filled transformer loading capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1994,30(1):170-178.
- [16] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
XIE Yucheng. Power transformer handbook[M]. Beijing: China Machine Press,2003.
- [17] 邓建钢,王立新,聂德鑫,等. 内置光纤光栅油浸式变压器的研制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):160-167.
DENG Jiangang,WANG Lixin,NIE Dexin,et al. Development of oil-immersed transformers with built-in fiber bragg grating sensors[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(24):160-167.
- [18] 王丰华,周翔,高沛,等. 基于绕组热分布的改进油浸式变压器绕组热点温度计算模型[J]. 高电压技术,2015,41(3):895-901.
WANG Fenghua,ZHOU Xiang,GAO Pei,et al. Improved thermal circuit model of hot spot temperature in oil-immersed transformers based on heat distribution of winding[J]. High Voltage Engineering,2015,41(3):895-901.
- [19] 苏小平,陈伟根,胡启元,等. 基于解析—数值技术的变压器绕组温度分布计算[J]. 高电压技术,2014,40(10):3164-3170.
SU Xiaoping,CHEN Weigen,HU Qiyuan,et al. Calculation for transformer winding temperature distribution by numerical analytical technology[J]. High Voltage Engineering,2014,40(10):3164-3170.
- 文正其(1985—),男,硕士,工程师,从事输变电设备状态评估及故障诊断技术研究。
- 卢文华(1977—),男,博士,高级工程师,从事变压器试验、状态监测及故障诊断技术的研究。
- 杜振波(1982—),男,硕士,高级工程师,从事变压器试验、状态监测及故障诊断技术的研究。
- 向冬冬(1987—),男,硕士,工程师,从事输变电设备在线监测及系统集成技术研究。
- 李建超(1985—),男,学士,工程师,从事电气自动化技术研究。