

就地化分布式母线保护性能分析

陈琦^{1,2}, 陈福锋^{1,2}, 张尧^{1,2}, 王永旭^{1,2}, 唐治国^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 南京 210003; 2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 南京 211153)

摘要:介绍了目前已有的分布式母线保护方案,并将环网无主机式结构的就地化分布式母线保护与传统的集中式母线保护装置,从继电保护的四性(可靠性、速动性、选择性、灵敏性)等方面进行了对比分析。通过分析和试验发现,就地化分布式母线保护在可靠性与速动性方面比传统母线保护存在优势,选择性和灵敏性上两者性能相同。同时,就地化分布式母线保护在安装和运行维护方面也有一定的优势。通过各项性能的对比,认为就地化分布式母线保护有潜力取代传统集中式母线保护,是未来新一代智能变电站母线保护的发展方向。

关键词:智能变电站;继电保护;就地化;分布式母线保护;环网;无主机式

中图分类号:TM 772

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2017)06-0006-04

0 引言

随着智能电网的发展,新一代智能变电站正慢慢兴起,继电保护被划分为广域级、站域级和就地级,母线保护属于就地级^[1],传统的集中式母线保护已经不能适应就地下放的要求,而就地化分布式母线保护因其面向间隔、可就地安装等特点,开始显现出在新要求下的优势和应用前景。

目前,集中式母线保护主要分为电缆采样、电缆跳闸的常规保护装置和数字采样、面向通用对象的变电站事件(GOOSE)跳闸的数字保护装置 2 种。常规装置与电流互感器(CT)、断路器通过电缆连接,存在从 CT 二次绕组到保护小室距离长,CT 二次阻抗较大,不利于防止 CT 饱和的问题。变电站内电磁干扰大,过长的电缆也使得模拟信号容易受到干扰。数字装置通过合并单元采样,智能终端跳闸,中间多了 2 个环节,降低了保护的可靠性和速动性,尤其是目前合并单元性能不稳定,容易出现飞点、丢帧等异常现象导致保护误动作。除此之外,随着电力系统的发展,变电站规模越来越大、出线越来越多,使得母线保护所处理的数据量越来越大,对保护的处理器提出了更高的要求,势必使保护装置硬件结构更加复杂,这也降低了装置的可靠性^[2]。

就地化分布式母线保护面向间隔就地安放在开关场,分布式数据采集,保护装置内部采用光纤通信,大大缩短了与 CT 和断路器的距离,提高了抗干扰能力。就地化分布式母线保护还可以实现分布式计算,减少处理器的负担,简化硬件回路,增加装置可靠性。由于其面向间隔,使得后期扩建时只需在

扩建间隔增加分布式子机,大大提高了保护的可扩展性,并且进一步利用其面向间隔的分布式结构,可以将母线保护功能扩展,便于与线路保护和主变压器(以下简称主变)保护进行纵向集成。

关于就地化分布式母线保护已经有很多研究^[3-17],目前国内外的继电保护厂家也已经研制出分布式母线保护产品,不过这些产品尚不能达到无防护就地化安放的要求。

1 就地化分布式母线保护

目前提出的就地化分布式母线保护分为有主机式和无主机式,有主机式由一个主单元和面向各个间隔安放的子单元构成,子单元负责采样和执行主单元的指令,主单元获取子单元的采样值进行保护逻辑计算;无主机式没有主单元,每个面向间隔安放的子机对等,各个子机各自采样,共享数据,独立运算。保护各个装置的通信架构又可以分为星形网和环网,综上所述共有如下 3 种类型的保护装置。

(1)星形中心主机式如图 1 所示,主机负责运算和与后台通信,子机负责采样和执行,该方案与目前智能变电站中母线保护加合并单元和智能终端的架构类似。

(2)环网有主机式如图 2 所示,面向每个间隔安放一个子机,子机负责采样、刀闸位置获取和执行主机命令,再安放一个专门负责计算和与后台通信的主机,各个装置间通过光纤环网传输数据。

(3)环网无主机式如图 3 所示,面向每个间隔安放一个子机,子机与外部通过电缆进行采样和开关量收发,子机间通过双向光纤环网数据,各个子机独立进行保护逻辑运行判断,在子机中选择 2 个子机与后台通信,互为备用。为了提高可靠性,子机间

采用两路独立的双向光纤通信。

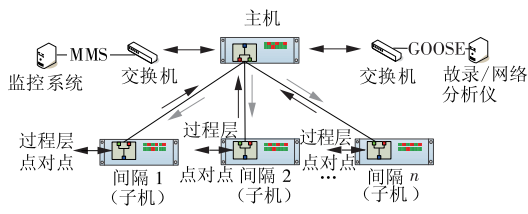


图1 星形中心主站式母线保护

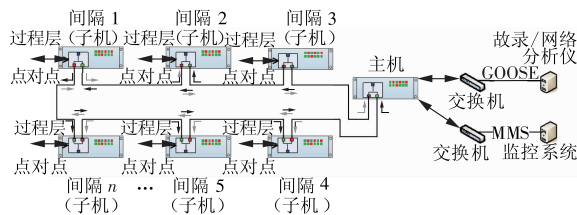


图2 环网有主站式母线保护

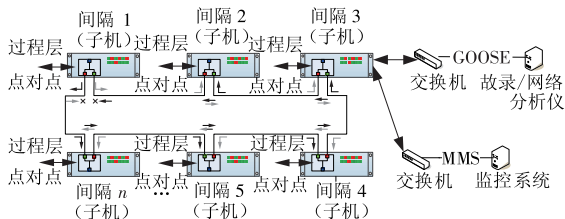


图3 环网无主站式母线保护

可以看到,星形中心主机式与现有数字变电站母线保护的结构类似,优势不明显,就地化分布式母线保护中不应再考虑这种方案。环网方式因其结构简单清晰,单装置接口数量少,相比于传统母线保护更适合保护就地化的要求。环网有主站式实现简单,子机不需要进行保护计算,硬件结构简单,但若因检修或故障导致主机退出运行则整个母线保护会失去中心而退出运行。相比而言,环网无主站式实现复杂,每个子机都需要进行保护计算,子机硬件复杂度也会提高,但该模式下任一子机检修或故障时,可以用光旁路开关将该子机在环网中隔离,不影响其他间隔的继续运行,并因每个子机都具备保护功能,其后期的功能可发展性更强,所有从长远来看,环网无主站式母线保护是未来的发展方向。

基于上文分析,下面选择采用双光纤环网的无主站式结构的就地化分布式母线保护与传统的集中式母线保护装置,从继电保护的四性(可靠性、速动性、选择性、灵敏性)等方面进行对比分析。

2 分布式与集中式母线保护性能对比

2.1 可靠性

可靠性包括安全性和信赖性,是对继电保护性能的最根本要求,取决于保护装置本身的研发、制造质量以及保护回路的连接和运行维护水平。母线保护误动会严重影响电力系统运行的安全性,需要保

证装置不误动。影响继电保护可靠性的主要有如下因素^[18-21]:(1)装置硬件——与装置的硬件数量、质量和设计等有关;(2)装置软件——分布式与集中式保护算法原理相同,且分布式单个装置计算量小,冗余度大,可靠性会更高一点;(3)互感器等一次相关设备;(4)二次回路——分布式母线保护面向间隔就地安放,电缆长度短,相比于集中式装置发生故障概率小,且子机之间采用双环网光纤通信,有冗余,且有自我监视及报警功能,安全可靠;(5)继电保护定值设置。

分析上述因素可知,对比二者的可靠性,重点在于装置硬件的可靠性。首先对比二者的故障率,故障率与装置的元件数量和质量有关,假设二者为实现相同功能使用的元件相同,硬件设计相似,并且分布式装置是将集中式装置的功能元件拆分安放。

最大支持 n 个间隔的集中式元件数量

$$A_{\text{sum}} = A_0 + A_n, \quad (1)$$

式中: A_{sum} 为元件总数量; A_0 为装置上与间隔数量无关的元件数量,包括电源,处理器等; A_n 为与间隔数量相关的元件数量,包括互感器,开入开出等。

分布式装置子机可以近似认为,分布式保护单个子机由与集中式装置相同的、与间隔数量无关的元件 A_0 和与间隔数量相关的 A_n 的 $1/n$ 构成。子机间由光纤连接,但因其使用双环网冗余结构,且具备自检功能,能及时发出异常告警,任一光纤回路中断不会使保护退出运行,且2个环网同时中断的概率可以不考虑,所以可以忽略环网光纤的故障率,因此分布式单个子机元件数量

$$A_1 = A_0 + A_n/n, \quad (2)$$

则整个分布式母线保护元件数量

$$A_{\text{sum1}} = nA_1 = nA_0 + A_n, \quad (3)$$

假设每个元件的故障率分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$, 则集中式装置的故障率

$$\lambda = 1 - (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2) \cdots (1 - \lambda_k). \quad (4)$$

通过近似简化,并结合式(1),故障率可近似表示为

$$\lambda \approx \sum_{k=1}^{A_{\text{sum}}} \lambda_k = \sum_{k=1}^{A_0} \lambda_k + \sum_{i=1}^{A_n} \lambda_i. \quad (5)$$

集中式装置任一元件故障则整个保护退出运行,而分布式装置由于单个子机故障只影响本身间隔的运行,通过光旁路开关将故障间隔隔离,其他间隔继续运行,因此,对于母线而言其故障率应该是装置故障率的 $1/n$,即

$$\lambda \approx \sum_{k=1}^{A_1} \lambda_k = \sum_{k=1}^{A_0} \lambda_k + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{A_n} \lambda_i. \quad (6)$$

可以看到,分布式母线保护装置的故障率要低

于集中式装置,而且随着间隔数量的增长,故障率差别增大。

装置故障后的退出运行时间也是可靠性的重要指标,在故障后,就地化分布式母线保护装置因其采用预制电缆,即插即用,且面向间隔,子机结构简单,因此修复和检修的时间都会短于集中式保护装置。

同时,可靠性也应该以装置故障后造成的损失作为评判标准,对于集中式装置而言,其因故障导致的误动会使整个母线跳闸,而分布式装置由于采用与集中式装置相同的算法和原理,两者的误动概率一致,但由于间隔子机动作只跳对应间隔,对系统造成的冲击和造成的损失要小得多。

综上可知,就地化分布式母线保护装置的可靠性要高于传统集中式母线保护。

2.2 速动性

速动性是指尽可能快地切除故障,以减少设备及用户在大短路电流、低电压下运行的时间,降低设备的损坏程度,提高电力系统并列运行的稳定性。下面对集中式常规装置、集中式数字装置和分布式装置进行速动性比较。

集中式常规保护装置通过电缆进行采样和保护动作出口,架构如图 4 所示,电信号在电缆中的传播速度接近于光速,延时可以忽略,系统的采样和跳闸逻辑集成在保护装置中,中间环节造成的延时基本为 0。整个系统的动作时间 t 为 A/D 转换时间(可忽略)、保护逻辑判断时间和出口继电器动作时间之和

$$t = t_L + t_R, \tag{7}$$

式中: t_L 为保护逻辑判断时间; t_R 为继电器动作时间。 t_L 与保护算法有关,目前母线区内故障(1.5 倍差动定值) t_L 在 10 ms 左右, t_R 在 5 ms 左右。



图 4 集中式常规保护架构

集中式数字保护装置通过合并单元采样,智能终端跳闸出口,架构如图 5 所示,相比于图 4 所示的架构,增加了合并单元和智能终端两个中间环节,忽略光纤上数据传输时间,相比于集中式常规保护,保护动作时间增加了合并单元延时、智能终端延时以及主机到子机到智能终端的 GOOSE 转发的时间。其中,合并单元延时主要包括:合并单元从模拟量输入到转换生成采样值(SV)报文并输出,保护装置接收到 SV 报文进行解析,并进行插值重采样然后发送给保护逻辑单元。智能终端延时为,从保护发送

GOOSE 报文到智能终端收到报文,解析报文后继电器出口时间^[22]。所以,整组动作时间

$$t = t_M + t_L + t_I + t_T, \tag{8}$$

式中: t_M 为合并单元延时; t_I 为智能终端延时; t_T 为 GOOSE 传输延时。一般而言, t_M 平均时间为 2 ms 左右, t_I 平均时间为 6 ~ 8 ms, t_T 平均时间为 2 ~ 3 ms。

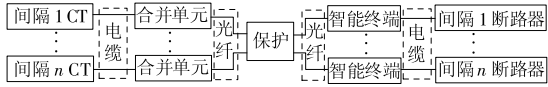


图 5 集中式数字母线保护

分布式保护装置各子机负责本间隔的跳闸,对外通过电缆进行采样和保护动作出口,装置内部采用双向光纤传输数据,架构如图 6 所示,其与图 4 架构相比,增加了保护内部子机间的通信时间,所以整组动作时间

$$t = t_L + t_P + t_R, \tag{9}$$

式中: t_P 为子机间的采样值传输时间,此时间与环网中子机的数量有关,目前已有产品采用千兆光纤的高速环网,能保证在接入不大于 36 间隔子机时最大延时不超过 1 ms。

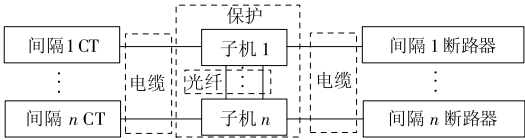


图 6 分布式保护架构

因三者算法相同,所有保护逻辑时间 t_L 没有差别,差别主要源于其他中间环节。通过上面分析比较可以看到,传统集中式常规保护装置因没有中间延时,动作时间最短;而目前在智能变电站中大量使用的集中式数字保护装置,因增加了 2 个中间环节导致其动作时间比常规保护长 7 ms 左右;就地化分布式母线保护装置,因子机间数据传输导致动作时间相比于集中式常规保护延迟约 1 ms,但相对于集中式数字保护装置,仍有 6 ms 左右的优势。

在实验室搭建环境组装上述 3 种装置(含合并单元、智能终端)分别进行动作时间测量试验,三者加同样的故障量(1.5 倍差动电流定值),测量整组动作时间,测量 10 次取平均值,结果见表 1。

表 1 3 种保护动作时间 ms

装置类别	平均时间
集中式常规装置	15.6
集中式数字装置	22.1
就地化分布式装置	16.4

综上所述,就地化分布式母线保护装置速动性相对于集中式常规保护有少许延时,但相对于目前智能变电站大量使用的集中式数字保护装置有明显

的优势,可以有效提高新一代智能变电站母线保护的速动性。

2.3 选择性

选择性是指保护装置动作时应在最小的区间内将故障从电力系统中断开,选择性与保护算法的原理和电流电压互感器的安放位置有关。

集中式母线保护和就地化分布式母线保护的差动保护算法原理相同,计算母线“大差”和“小差”的方法以及制动系数均一致。母线“大差”是指除母联开关和分段开关外所有支路电流所构成的差动回路,用于判别母线区内和区外故障。某段母线的“小差”是指该段母线上所连接的所有支路(包括母联和分段开关)电流构成的差动回路,作为故障母线选择元件。保护判据如下:

$$I_d \geq I_1, \tag{10}$$

$$I_d \geq K_1 I_r, \tag{11}$$

式中: $I_d = |\sum_{j=1}^n i_j|$ 为差电流,等于各连接单元电流相量和的模; $I_r = \sum_{j=1}^n |i_j|$ 为制动电流,等于各连接单元电流相量模之和; I_1 为差电流启动值; K_1 为制动系数启动值,一般取 0.3~0.6。

实际工程中,该算法再结合母线电压闭锁、CT 饱和判断和 CT 二次断线判断闭锁功能,能准确判断区内和区外故障。

就地化分布式母线保护与传统的集中式母线保护的 CT 安装位置相同,即在相同的位置采样,而且两者获取的刀闸位置和保护算法均相同,所以二者选择性相同。

2.4 灵敏性

灵敏性是指对于其保护范围内发生故障或正常运行状态的反应能力。与上文选择性中的分析相似,集中式与分布式母线保护所采用的差动比例制动,以及辅助的电压闭锁,CT 饱和判断和 CT 二次断线判断闭锁等算法都是相同的,而且 CT 与 PT 安放的位置也相同,在保护定值整定相同的情况下,二者的灵敏性也没有差别。

2.5 其他方面

在上述 4 个方面之外,由于就地化分布式母线保护装置采用预置电缆实现了即插即用,大大提高了安装效率和正确率,减少了安装、运行和维护时误接线、误碰线导致的保护误动作,同时也可以改进运维模式,采用工厂化调试和更换式检修,大幅减少二次设备安装、调试和检修时间。

随着继电保护的发展,一、二次设备融合也是未来的发展方向,集中式母线保护不面向间隔,无法实现融合,而就地化分布式母线保护面向间隔的架构

使其未来可以实现间隔纵向集成装置,促进一、二次设备融合进一步发展。

3 结论

通过以上多个方面的对比,就地化分布式母线保护在可靠性和速动性上与传统集中式母线保护相比有明显优势,选择性和灵敏性上与传统集中式母线保护性能相同,经济性上目前还存在劣势,但随着智能变电站的发展和就地化的推动,分布式母线保护经济性上的优势显现,并且就地化分布式母线保护还有安装、运行维护和其他方面的优势。因此,就地化分布式母线保护是未来母线保护的发展方向。

参考文献:

[1] 宋璇坤,刘开俊,沈江. 新一代智能变电站研究与设计[M]. 北京:中国电力出版社,2014: 146-147.

[2] 沈健,宋斌,张道农,等. 智能变电站测控与同步相量测量集成装置研制[J]. 电力科学与技术学报,2016, 31(3): 3-7.

[3] 许汉平,吴俊鹏,叶婧,等. 数字化变电站继电保护动作全过程仿真系统研究与开发[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(4): 12-17.

[4] 王慧阳. 基于 IEC 61850 标准的分布式母差保护的研究[D]. 西安:西安科技大学,2009.

[5] 李斌,马超,贺家李,等. 基于 IEC 61850 的分布式母线保护方案[J]. 电力系统自动化,2010, 34(20): 66-70.

[6] 邹贵彬,王晓刚,高厚磊,等. 新型数字化变电站分布式母线保护[J]. 电力自动化设备,2010, 30(11): 94-97.

[7] 操丰梅,宋小舟,秦应力. 基于数字化变电站过程层的分布式母线保护的研制[J]. 电力系统自动化,2008, 32(4): 69-72.

[8] 段建东,张保会,张胜祥. 利用线路暂态行波功率方向的分布式母线保护[J]. 中国电机工程学报,2004, 24(6): 11-16.

[9] 王攀峰,张克元,文明浩,等. 应用于数字化变电站的分布式母线保护的研究[J]. 电力系统保护与控制,2009, 37(13): 68-71.

[10] 刘伟,倪传坤,杨恢宏,等. 智能变电站分布式母线保护实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 139-141, 146.

[11] 董杏丽,徐瑞东,薄志谦,等. 分布式母线保护技术及实现[J]. 继电器,2005, 33(14): 19-22.

[12] 王风光,焦彦军,张新国,等. 一种分布式母线保护的新型通信方案[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 76-78, 84.

[13] 孙伟兵. 面向智能变电站的分布式母线保护研究[D]. 济南:山东大学,2012.

[14] 周小波,汪思满,吴正学,等. 环网分布式母线保护装置就地化实现探讨[J]. 电力系统保护与控制,2015, 43(6): 104-108.

(下转第 31 页)

4 结论和建议

(1)由历次试验结果对比分析可知,S109FA 燃气-蒸汽联合循环机组热耗率增加了 8.94%,机组出力降低了 6.33%,高、中压缸效率与设计值相比分别下降了 2.71 个百分点和 3.45 百分点,可见,机组的热经济性已经明显下降。因此,应及时对运行中出现的问题进行有针对性的定期检查,对出现的问题及时处理,确保其安全性。

(2) 实施汽轮机通流部分改造,是提高 D10 型汽轮机经济性能的根本解决措施。因此,建议结合机组检修安排,对其进行通流部分改造,从而达到节能增效的目的。

参考文献:

- [1]温建国. 600 MW 汽轮机性能诊断[D]. 北京:华北电力大学, 2009.
- [2]邓伟. 600 MW 超临界汽轮机热力性能诊断及供热分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- [3]王攀, 王泳涛, 王宝玉. 基于多因素耦合变工况理论的汽轮机组节能诊断技术的研究及应用[J]. 汽轮机技术, 2015, 57(6): 461-463.
- [4]ORTEGA F, MENENDEZC, ORDIERES J, et al. Analysis of heat transference in the regenerative exchanger of a thermal power plant [J]. Neural computing & applications, 2000 (9): 218-226.
- [5]范卫军, 邬振耀, 忻建华, 等. 可组态的汽轮机组在线热经济性分析系统[J]. 发电设备, 1999(4): 47-50.

(上接第9页)

- [15] 朱林, 苏盛, 段献忠, 等. 基于 IEC 61850 过程总线的分布式母线保护研究[J]. 继电器, 2007, 33(s1): 40-44.
- [16] 李莹. 分布式微机母线保护的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2000.
- [17] 唐治国, 汪思满, 康丰, 等. 多级级联分布式母线保护方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 136-141.
- [18] 马超. 基于 IEC61850 的分布式母线保护研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [19] 李伟. 分布式微机母线保护的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [20] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 42-48.
- [21] 周玉兰, 詹荣荣, 舒治淮, 等. 2003 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况与分析[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 48-53.
- [22] 戴志辉. 继电保护可靠性及其风险评估研究[D]. 北京:

- [6] 张雄, 胥建群, 周克毅. 全图形化热力发电厂热力系统通用计算软件[J]. 汽轮机技术, 2002, 44(5): 271-306.
- [7] 李慧. 抽汽式汽轮机通流部分节能潜力诊断方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2010.
- [8] 孔庆甫. D10 汽轮机的高压通流受阻运行分析[J]. 浙江电力, 2010, 29(8): 31-52.
- [9] 阎维平, 阚伟民, 肖小清. ASME PTC 6.2—2011 联合循环电站汽轮机性能试验规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 3-90.
- [10] 丁勇能, 朱伟雄. 9FA 燃机/汽轮机主蒸汽截止和控制阀故障[J]. 设备管理与维修, 2010(4): 18-19.
- [11] 汪学峰. 汽轮机叶片结垢原因分析及解决措施[J]. 东方汽轮机, 2010(3): 55-58.
- [12] 林庆城. 汽轮机通流部分结垢原因及防范措施[J]. 热力发电, 2005, 34(7): 27-29.
- [13] 丁旭春, 王毅, 殷志龙, 等. 超临界 630 MW 机组汽轮机通流结垢诊断及处理[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 138-141.
- [14] 李勇, 徐君诏, 黄萍力. 凝汽式汽轮机通流部分结垢诊断方法研究[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(5): 371-373.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

蔡雨(1991—),男,安徽宿州人,在读硕士研究生,从事汽轮机通流部分性能诊断方面的研究工作(E-mail: 676837964@qq.com)。

李蔚(1974—),女,浙江金华人,副研究员,从事汽轮机热力设计、转子系统稳定性分析方面的研究工作(E-mail:energy@zju.edu.cn)。

华北电力大学,2012.

- [23] 王同文, 谢民, 孙月琴, 等. 智能变电站继电保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 58-66.
- [24] 庞福滨, 杨毅, 袁宇波, 等. 智能变电站保护动作时间延时特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 86-92.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

陈琦(1985—),男,江苏盐城人,工程师,从事继电保护与控制技术领域的研发工作(E-mail: carl - qi. chen@ sac - china. com)。

陈福锋(1979—),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事继电保护与控制技术领域的研发工作。

张尧(1984—),男,陕西商洛人,工程师,从事继电保护与控制技术领域的研发工作。