第 43 卷　第 6 期　2019 年 3 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20180528008
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 43 No. 6 Mar. 25，2019

基于 GOOSE 网络的智能变电站变压器纵差保护方案

倪传坤[1]，于同伟[2]，邓茂军[1]，李宝伟[1]，胡叶宾[1]，李　旭[1]
（1. 许继集团有限公司，河南省许昌市 461000；2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院，辽宁省沈阳市 110006）

摘要：变压器纵差保护启动电流需要躲过正常运行时的不平衡电流，而不平衡电流主要由变压器有载调压分接开关挡位调节引起。当有载调压分接开关挡位调节范围大时，变压器纵差保护启动电流定值整定较高，影响了差动保护的灵敏度。文中提出通过智能变电站通用面向对象变电站事件（GOOSE）网络获取变压器调压分接开关的挡位信息，再根据调压分接开关的实际挡位自动调整纵差保护的平衡系数，消除变压器正常运行时挡位调节引起的不平衡电流。同时提出基于 GOOSE 网络的纵差保护整定方法，降低差动保护的启动电流和比率制动系数，并对纵差保护的动作特性进行了分析改进。试验结果表明，方案可提高变压器纵差保护的灵敏性及速动性。

关键词：智能变电站；纵差保护；GOOSE 网络；挡位信息；平衡系数；灵敏度

0　引言

针对目前智能变电站存在的一些问题，国家电网有限公司提出了以“采样数字化、保护就地化、元件保护专网化、信息共享化”为特征的就地化保护新技术[1-4]，通过减少数据传输中间环节，进一步提升继电保护的速动性和可靠性。变压器纵差保护启动电流需要躲过变压器正常运行时的最大不平衡电流，通常按变压器高压侧二次额定电流整定的 40%～60%，当变压器有载调压分接开关挡位调节范围大时，纵差保护启动电流整定更高，且纵差保护各侧电流经星角变换后消除了故障电流中的零序分量。因此，变压器内部发生匝间故障或高阻接地故障时纵差保护的灵敏度较低。另一方面，变压器纵差保护受励磁涌流的影响，内部故障时可能延迟动作甚至拒动。

统计资料显示变压器差动保护正确动作率远低于线路保护[5]，这与变压器正常运行时存在较大的不平衡电流有关，产生不平衡电流的主要因素包括电流互感器（TA）误差、调压分接开关挡位调整、两侧 TA 计算变比与实际变比不一致。微机保护可通过软件调整计算变比与实际变比不一致引起的不平衡电流，因此变比影响因素可忽略不计。随着新一代智能变电站的建设，电子式互感器也逐步在智能变电站推广应用，保护用电子式 TA 在额定一次电流下的误差通常不超过 1%，因此调压分接开关挡位调整成为变压器纵差保护不平衡电流的主要来源。

消除有载调压分接开关挡位调节引起的不平衡电流可降低变压器纵差保护的启动电流定值[6-9]，提高变压器纵差保护的灵敏度。本文提出一种通过智能变电站通用面向对象变电站事件（GOOSE）网络获取变压器调压分接开关的挡位信息，再根据调压分接开关的实际挡位信息自动调整纵差保护的平衡系数，同时提出基于 GOOSE 网络的纵差保护整定方法，并对纵差保护动作特性进行了改进。

1　基于 GOOSE 网络的纵差保护方案

智能变电站采用 IEC 61850 通信协议，变压器保护装置和变压器本体智能单元之间可通过过程层 GOOSE 网络进行连接[10-13]。基于 GOOSE 网络的纵差保护整体方案如下。

1）变压器本体智能单元采集有载调压分接开关的实际挡位信息并发送到过程层 GOOSE 网络。

2）变压器保护装置通过 GOOSE 网络获取调压分接开关的挡位信息。

3）变压器保护装置根据有载调压分接开关的实际挡位信息自动调整纵差保护平衡系数。

基于 GOOSE 网络的变压器纵差保护整体架构如图 1 所示。

收稿日期：2018-05-28；修回日期：2018-10-18。
上网日期：2019-00-00。
国家电网公司科技项目（5222LK17001F）；河南省科技研发专项资助项目（184100510023）。

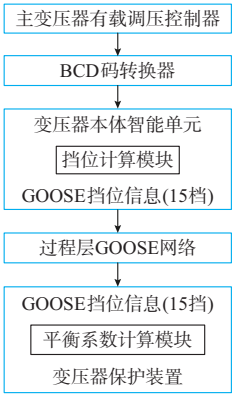

图 1　基于 GOOSE 网络的纵差保护整体架构
Fig. 1　Overall architecture of longitudinal differential protection based on GOOSE network

1.1　变压器挡位信息采集方式

变压器本体智能单元包括非电量保护、有载调压分接开关控制智能电子设备(IED)、溶解气体分析(dissolved gas analysis，DGA)监测 IED 等。本体智能单元下放到变压器旁的户外柜，测控信息通过光纤经过程层 GOOSE 网络与间隔层设备相连。

主变压器调压控制器的调压分接开关位置经 BCD 码制转换器转换成 BCD1～BCD6 共 6 路挡位开出[14]，再通过电缆接入变压器本体智能单元对应的开入，本体智能单元根据 6 路开入的状态计算出调压分接开关的实际挡位并发送到过程层 GOOSE 网络。变压器保护装置通过 GOOSE 网络获取主变压器调压分接开关的实际挡位信息。

1.2　纵差保护平衡系数调整方案

从 GOOSE 网络接收调压分接开关的挡位信息后，变压器保护装置平衡系数计算模块需要根据调压分接开关的实际挡位(设为 X)自动调整纵差保护的平衡系数。

因不同变压器的最大挡位数、中间挡位数及每挡调压百分数存在差异，为了适应各种类型的变压器，保护装置中增加了三个系统定值：变压器最大挡位数 N、中间挡位数 M 及每挡调压百分数 ΔV，其中变压器的最大挡位数不能超过 39。采用调整高压侧平衡系数的方案，其他侧平衡系数不变。高压侧平衡系数 K_h 调整公式为：

$$K_h=(X-M)\Delta V+1 \qquad 1\leqslant X\leqslant N \tag{1}$$

根据调压分接开关的实际挡位，纵差保护自动调整高压侧平衡系数，消除挡位调节引起的不平衡电流。

2　基于 GOOSE 网络的纵差保护整定

2.1　纵差保护启动电流

纵差保护启动电流 $I_{op,0}$ 应按变压器额定负载运行时的最大不平衡电流整定[15]，即

$$I_{op,0}=K_{rel}(K_{er}+\Delta U+\Delta m)I_e \tag{2}$$

式中：K_{rel} 为可靠系数，取 1.3～1.5；K_{er} 为 TA 在额定电流下的变比误差，TA 为 5P 或 5TPE 型时 K_{er} 取 0.01×2；ΔU 为变压器分接头调节引起的误差(相对额定电压的百分数)；Δm 为 TA 变比未完全匹配产生的误差，智能变电站保护装置内部已经没有小 TA 变换，误差主要为保护装置软件插值算法误差，Δm 不超过 0.01；I_e 为二次额定电流。

式(2)中影响纵差保护启动电流的主要因素是变压器分接头调节引起的误差，没有挡位跟踪前 ΔU 取 0.10，计算可得 $I_{op,0}$ 为 $0.195I_e$，可取为 $0.3I_e$～$0.4I_e$；差流越限告警定值取 $0.2I_e$。

新一代智能变电站中变压器调压分接头的挡位虽然可通过网络获取，考虑挡位信息通过 GOOSE 网络交换机后的实时性，保护装置获取的调压分接头位置可能滞后，由于变压器每次挡位调节时通常只调节一个挡位，特殊情况下可能调节两个挡位，故 ΔU 取 0.025，计算可得 $I_{op,0}$ 为 $0.082\ 5I_e$，可取为 $0.2I_e$；差流越限告警定值取为 $0.1I_e$。

2.2　比率制动系数

纵差保护的动作电流应躲过外部短路时流过差动回路的不平衡电流。以三圈变压器低压侧外部相间 k 点短路为例，纵差保护回路最大不平衡电流 $I_{umb,max}$ 为：

$$I_{umb,max}=K_{ap}K_{cc}K_{lim}I_{k,max}+\Delta U_h I_{k,h,max}+\Delta U_m I_{k,m,max}+\Delta m_{\mathrm{I}} I_{k,\mathrm{I},max}+\Delta m_{\mathrm{II}} I_{k,\mathrm{II},max} \tag{3}$$

式中：K_{ap} 为非周期分量系数，两侧为 5P 或 5TPE 型电子式 TA 取 1.0；K_{cc} 为 TA 的同型系数，取 1.0；K_{lim} 为 TA 在额定准确限值电流下的变比误差，TA 为 5P 或 5TPE 型时 K_{lim} 取 0.05×2；$I_{k,max}$ 为低压侧外部短路时，流过靠近故障侧 TA 的最大短路电流周期分量(归算到高压侧的 TA 二次值)；ΔU_h 和 ΔU_m 分别为变压器高、中压侧调压引起的相对误差(相对额定电压的百分数)；$I_{k,h,max}$ 和 $I_{k,m,max}$ 分别为低压侧外部短路时，流过高、中压侧 TA 电流的周期分量(归算到高压侧的 TA 二次值)；$I_{k,\mathrm{I},max}$ 和 $I_{k,\mathrm{II},max}$ 分别为低压侧外部短路时，流过非靠近故障点的两侧 TA 电流的周期分量(归算到高压侧的 TA 二次值)；Δm_{I} 和 Δm_{II} 为保护装置软件插值算法产生的误差，均取 0.01。

由式(3)得出三圈变压器的最大不平衡电流 $I_{umb,max}$ 在没有挡位跟踪前为 $(0.1+0.1+0.01)I_{k,max}=0.21I_{k,max}$，增加挡位跟踪后 $I_{umb,max}$ 为 $(0.1+0.025+0.01)I_{k,max}=0.135I_{k,max}$。差动动作

电流最大值 $I_{op,max}$ 需要躲过差动保护回路的最大不平衡电流，取 $1.5I_{umb,max}$，比率制动系数计算公式为：

$$S=\frac{I_{op,max}-I_{op,0}}{I_{res,max}-I_{res,0}} \tag{4}$$

式中：$I_{res,max}$ 为计算最大不平衡电流时所用的制动电流；$I_{res,0}$ 为纵差保护制动电流最小值。设 $I_{k,max}$ 为 $5I_e$，则 $I_{res,max}$ 为 $5I_e$，$I_{res,0}$ 为 $0.8I_e$，没有挡位跟踪前 $I_{op,max}$ 为 $0.21\times1.5\times5I_e=1.575I_e$，取 $I_{op,0}$ 为 $0.3I_e$，计算可得 S 为 0.304，可取为 0.5；增加挡位跟踪后，$I_{op,max}$ 为 $0.135\times1.5\times5I_e=1.012\ 5I_e$，取 $I_{op,0}$ 为 $0.2I_e$，计算 S 为 0.193，可取为 0.3。

3　变压器纵差保护动作特性的改进

纵差保护的电流取自变压器高压侧 TA、中压侧 TA 和低压侧外附 TA，需要考虑励磁涌流、过励磁及 TA 异常等情况。

为了提高纵差保护的动作速度，将差动保护动作区分为快速动作区和一般动作区两部分，一般动作区受励磁涌流、过励磁及 TA 异常闭锁，快速动作区不考虑励磁涌流、过励磁及 TA 异常，动作方程满足时直接动作于跳闸。一般动作区和快速动作区的动作方程分别如式(5)、式(6)所示：

$$\begin{cases} I_{op}>I_{op,0} & I_{res}\leqslant I_{res,0} \\ I_{op}\geqslant I_{op,0}+S(I_{res}-I_{res,0}) & I_{res}>I_{res,0} \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} I_{op}>k_1I_e \\ I_{op}>k_2I_{res} \end{cases} \tag{6}$$

式中：I_{op} 为差动电流；I_{res} 为制动电流。差动保护启动电流 $I_{op,0}$ 改进前为 $0.3I_e\sim0.4I_e$，改进后为 $0.2I_e$；最小制动电流 $I_{res,0}$ 为 $0.8I_e$；S 改进前为 0.5，改进后为 0.3。为了保证纵差保护快速动作区在变压器空投或区外故障时不误动，区内故障时能快速动作，式(6)中 k_1 按躲过变压器最大负荷电流的倍数设定，取 1.1～1.3；I_{res} 取变压器各侧电流中的最大值，k_2 取 1.2～1.4。改进后的差动保护动作逻辑及动作特性分别如图 2、图 3 所示。

快速动作区与差动速断保护都不经励磁涌流闭锁，动作时间都小于 20 ms，但在保护灵敏性方面有较大差异。差动速断保护在差流大于保护定值时快速动作，无制动特性，因此需要躲过变压器空投时的最大励磁涌流，通常按 $6I_e\sim8I_e$ 整定，而变压器内部故障时差流不易达到差动速断保护定值，因此差动速断保护只能在变压器内部发生严重故障时才能动作；快速动作区仅在差动保护判为区内故障时投入，由于增加了比率制动，且制动系数大于 1，变压器空投时的励磁涌流不会造成保护误动，因此快速动作区定值只需保证正常运行 TA 断线时保护不误动，按躲过变压器最大负荷电流的倍数设定。因此，与差动速断保护相比，快速动作区在变压器内部故障时的灵敏度高。

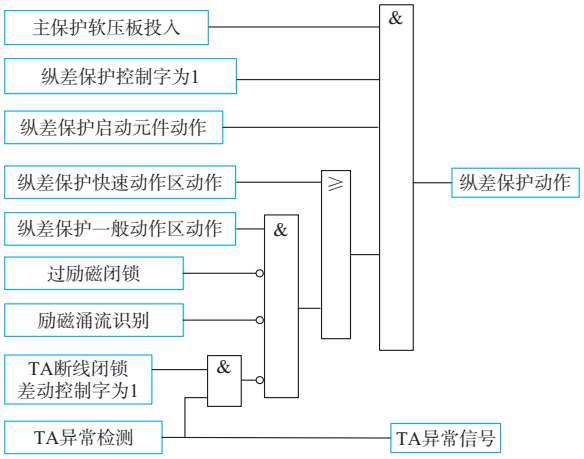

图 2　改进后的纵差保护动作逻辑

Fig. 2　Operation logic of improved longitudinal differential protection

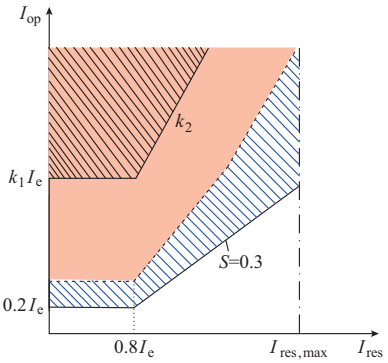

图 3　改进后的纵差保护动作特性

Fig. 3　Operation characteristics of improved longitudinal differential protection

图 3 中红色区域为纵差保护改进前的动作特性，蓝色区域和红色区域为纵差保护改进后的动作特性，其中黑色斜线区域是改进后纵差保护新增的快速动作区，可提高变压器内部故障时的纵差保护的速动性，蓝色区域可提高变压器内部匝间故障和高阻接地故障时纵差保护的灵敏性。

4　试验验证

根据变压器的原型参数，在实时数字仿真系统(RTDS)上建立了 220 kV 变压器保护动模试验模型，通过试验验证了所提变压器纵差保护改进方案的保护性能，变压器模型参数如附录 A 表 A1 所示，模型电气接线图如图 4 所示，保护试验接线图如图 5 所示。

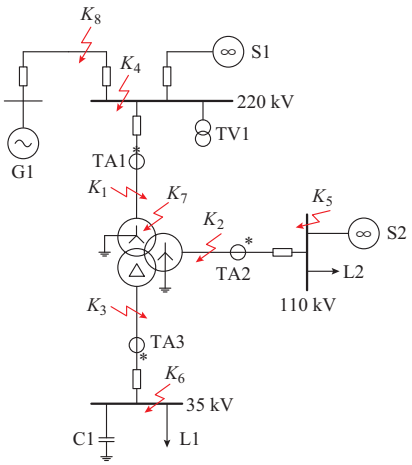

图 4　电气接线图

Fig. 4　Electrical wiring diagram

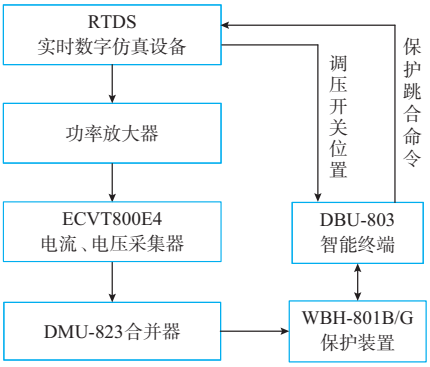

图 5　保护试验接线图

Fig. 5　Wiring diagram of protection test

引入变压器调压分接头的挡位后，差动保护启动电流为 $0.2I_e$，比率制动系数为 0.3，二次谐波制动系数为 0.15，差动保护分别进行了区内和区外金属性故障、经过渡电阻故障、匝间故障、区外发展性故障、区外转区内故障、系统振荡及振荡中故障、空投变压器试验、手合故障变压器试验、投切低压侧负载和 TA 断线试验，试验结果满足动模试验标准的要求。区内金属性故障时纵差保护经智能单元后的出口时间小于 30 ms，接地故障时耐过渡电阻能力为 350 Ω，匝间故障灵敏度为 1%。部分动模试验对比结果见附录 A 表 A2。

5　结语

本文提出通过智能变电站 GOOSE 网络获取变压器调压分接开关的挡位信息，再根据调压分接开关的实际挡位信息自动调整变压器纵差保护的高压侧平衡系数，以消除变压器挡位调节引起的不平衡电流。进一步提出了基于 GOOSE 网络的纵差保护整定方法，降低差动保护的启动电流和比率制动系数。最后提出了一种不受变压器励磁涌流、过励磁及 TA 异常闭锁的快速保护动作区，对纵差保护的动作特性进行了改进。试验结果表明，改进方案提高了变压器纵差保护严重故障时的速动性和匝间及高阻接地故障时的灵敏性。目前降低动作门槛对差动保护可靠性的影响没有得到充分验证，建议先降低差流越限告警定值提高二次回路异常报警的灵敏度，待条件成熟以及充分验证后再降低差动保护的启动电流和比率制动系数定值。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx）。

参 考 文 献

[1] 陈国平，王德林，裘愉涛，等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化，2017，41（16）：1-11. DOI：10.7500/AEPS20170219004.
CHEN Guoping，WANG Delin，QIU Yutao，et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems，2017，41(16)：1-11. DOI：10.7500/AEPS20170219004.

[2] 王玉玲，刘宇，樊占峰，等. 有限集中式就地化母线保护方案[J]. 电力系统自动化，2017，41（16）：35-40. DOI：10.7500/AEPS20170116002.
WANG Yuling，LIU Yu，FAN Zhanfeng，et al. Scheme of finitely concentrated outdoor installation bus protection[J]. Automation of Electric Power Systems，2017，41(16)：35-40. DOI：10.7500/AEPS20170116002.

[3] 王德林，裘愉涛，凌光，等. 变电站即插即用就地化保护的应用方案和经济性比较[J]. 电力系统自动化，2017，41(16)：12-19. DOI：10.7500/AEPS20170215010.
WANG Delin，QIU Yutao，LING Guang，et al. Application scheme and economical comparison of plug & play and outdoor installation protection in substation[J]. Automation of Electric Power Systems，2017，41（16）：12-19. DOI：10.7500/AEPS20170215010.

[4] 邓茂军，樊占峰，倪传坤，等. 就地化分布式变压器保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制，2017，45(9)：95-100.
DENG Maojun，FAN Zhanfeng，NI Chuankun，et al. Research on scheme of outdoor installation distributed transformer protection[J]. Power System Protection and Control，2017，45(9)：95-100.

[5] 沈晓凡，舒治淮，刘宇，等. 2008 年国家电网公司继电保护装置运行情况[J]. 电网技术，2010，34(3)：173-177.
SHEN Xiaofan，SHU Zhihuai，LIU Yu，et al. Statistics and analysis on operation situation of protective relayings of State Grid Corporation of China in 2008[J]. Power System Technology，2010，34(3)：173-177.

[6] 栗磊，宋小会，刘星，等. 串变调压电炉变压器差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(16)：118-121.
LI Lei，SONG Xiaohui，LIU Xing，et al. Research on differential protection of the furnace transformer which adopts series transformer used for voltage-regulation[J]. Power

System Protection and Control, 2014, 42(16): 118-121.

[7] 姚晴林，李瑞生，刘星，等. 电炉变压器成套保护装置研制[J]. 电力系统自动化，2012，36(17)：95-102.
YAO Qinglin, LI Ruisheng, LIU Xing, et al. Development of micropressor-based assembly protection equipment for furnace transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 95-102.

[8] 李岩军，周春霞，肖远清，等. 特高压有载调压变压器差动保护特性分析[J]. 中国电力，2014，47(9)：112-117.
LI Yanjun, ZHOU Chunxia, XIAO Yuanqing, et al. Analysis of differential protection characteristic for on-load-tap-changer transformer of UHV[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 112-117.

[9] 邓茂军，孙振文，马和科，等. 1 000 kV 特高压变压器保护方案[J]. 电力系统自动化，2015，39(10)：168-173.
DENG Maojun, SUN Zhenwen, MA Heke, et al. Protection scheme for 1 000 kV UHV transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 168-173.

[10] 倪益民，杨宇，樊陈，等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化，2014，38(3)：194-199.
NI Yimin, YANG Yu, FAN Chen, et al. Discussion on integration of secondary device in smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 194-199.

[11] 李瑞生，李燕斌，周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(21)：24-27.
LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan. The functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-27.

[12] 宋璇坤，李敬如，肖智宏，等. 新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设，2012，33(11)：1-6.
SONG Xuankun, LI Jingru, XIAO Zhihong, et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(11): 1-6.

[13] 肖燕. 新一代智能变电站信息流架构设计[J]. 中国电机工程学报，2016，36(5)：1245-1251.
XIAO Yan. Design of information flow scheme for new smart substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1245-1251.

[14] 邓茂军，吴起，陈亮，等. 基于电子式互感器的电炉变压器差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制，2011，39(9)：114-118.
DENG Maojun, WU Qi, CHEN Liang, et al. Study of furnace transformer differential protection based on electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 114-118.

[15] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京：中国电力出版社，2002.
WANG Weijian. Principle and application of electric power equipment protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

倪传坤(1980—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向：电力系统保护与控制。E-mail：xjtc_nichuankun@126.com

于同伟(1978—)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向：智能变电站技术。

邓茂军(1975—)，男，通信作者，硕士，教授级高级工程师，主要研究方向：电力系统保护与控制。E-mail：xjtc_dengmaojun@126.com

（编辑　代长振）

Transformer Longitudinal Differential Protection Based on GOOSE Network in Smart Substation

NI Chuankun[1], *YU Tongwei*[2], *DENG Maojun*[1], *LI Baowei*[1], *HU Yebin*[1], *LI Xu*[1]

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co. Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: For transformer longitudinal differential protection, the starting current should avoid the influence of unbalance current which is caused by the regulation of switch gear for on-load tap changer during the normal operation. When adjusting the wide range of switch gear, the sensitivity of differential protection would be influenced by high setting of the starting current. It is proposed that the gear position information could be obtained through the GOOSE network for the smart substation, and then the balance coefficient of the differential protection is adjusted automatically based on its actual gear position to eliminate the unbalanced current caused by gear position adjustment during the normal operation. Meanwhile, the tuning method of differential protection based on GOOSE network is proposed, which reduces the starting current and ratio restraint coefficient, also improves the operation characteristics of differential protection. The simulation results show that the improved scheme can enhance the sensitivity and quickness of the transformer differential protection.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5222LK17001F) and Science and Technology Project of Henan Province (No. 184100510023).

Key words: smart substation; longitudinal differential protection; GOOSE network; gear position information; balance coefficient; sensitivity