

高阻抗变压器相间短路后备保护灵敏度的提高

贺元康, 姜山, 郑州, 吕艳萍

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 高阻抗变压器的整定计算中, 高阻抗变压器的相间短路后备保护配置的复压过流保护和阻抗保护的灵敏度往往不能满足要求。根据一个工程中的整定计算实例对不完全差动保护的原理、不完全差动保护比率特性曲线、动作电流和制动电流的计算方法、动作判据、整定计算、变压器三侧绕组容量比为 100/100/50 时的灵敏度校验, 以及单变和双变并列运行时的灵敏度、动作时限进行了研究。研究结果表明, 配置不完全差动保护可以有效的提高灵敏度, 并且其原理简单易于实现, 并指出不完全差动保护应用于大电流接地系统中时, 防止区外故障时保护误动作的方法。

关键词: 高阻抗变压器; 相间短路; 后备保护; 整定计算; 灵敏度; 不完全差动保护

Sensitivity enhancement of backup protection for high impedance transformer phase-to-phase faults

HE Yuan-kang, JIANG Shan, ZHENG Zhou, Lü Yan-ping

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: During the relay protection setting calculation of high impedance transformer, the sensitivity of the overcurrent protection with composite start-up voltage and impedance protection of high impedance transformer often can not meet requirement. According to an setting calculation example in actual project, this paper analyzes the principle, ratio characteristic curve, calculating method of action current and brake current, action criterion, relay protection setting calculation, the sensitivity when the transformer three sides winding capacity ratio is 100/100/50, the sensitivity when transformer in parallel operation or individual operation, and time delay of the incomplete differential protection. The results show that the high impedance transformer configured with incomplete differential protection can improve the sensitivity effectively and the principle is simple and easy to be applied. This paper also points out the method when the incomplete differential protection used in the direct-ground system to prevent the external fault's misoperation.

Key words: high impedance transformer; phase-to-phase faults; backup protection; relay protection setting calculation; sensitivity; incomplete differential protection

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0067-05

0 引言

随着电网实现跨越式的发展, 电网容量越来越大, 电网短路电流水平也不断升高。采用高阻抗变压器是限制电网短路电流的有效方法。高阻抗变压器的实现方式^[1]有两种: 1) 改变变压器内部结构提高变压器阻抗; 2) 在变压器低压侧油箱内部设置限流电抗器。

采用了高阻抗变压器之后, 短路电流水平得以有效的降低^[2], 然而短路电流降低之后, 变压器相间短路后备保护的灵敏度往往不能满足要求, 本文提出不完全差动保护来提高变压器相间短路后备保护的灵敏度, 并对不完全差动保护的整定计算方法、灵敏度、动作时限进行深入分析。

1 高阻抗变压器相间短路后备保护整定计算中存在的问题

本文对图 1 所示的系统进行变压器相间短路后备保护整定计算, 通过实际计算来提出问题并且提出解决问题的方案。

1.1 系统和变压器参数

#1、#2 变压器均为三相三绕组有载调压高阻抗变压器, 其基本参数如下:

- 1) 高、中、低侧额定容量为: 180/180/90 MVA。
- 2) 额定电压: $(220 \pm 8 \times 1.5\%) / 115/10.5$ kV。
- 3) 额定频率: 50 Hz; 联结组标号: YNyn0d11。
- 4) 短路损耗: 高一中压为 461.14 kW; 高一低压为 314.02 kW; 中一低压为 283.55 kW。
- 5) CT、PT 变比: CT 为高压侧 800/1, 中压侧 1200/1; 低压侧 4000/1; PT 为高压侧 2200/1。
- 6) 基准值的选择: 基准容量 $S_0 = 100$ MVA; 基准电压、基准电流为高压侧 230 kV、251 A; 中压侧 115 kV, 502 A。

7) #1、#2 变压器短路阻抗和系统阻抗如图 1 所示。

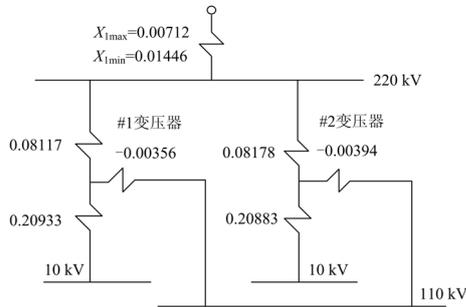


图 1 变压器及系统等值阻抗图

Fig.1 Equivalent impedance of transformer and the system

1.2 变压器相间短路后备保护整定计算

变压器三侧均装设复压过流保护作为相间短路后备保护，按照《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》对#1、#2 高阻抗变压器相间短路的后备保护进行整定计算。由于#1 变和#2 变参数相近，可采用相同的定值^[3]，具体整定过程如下：

1.2.1 220 kV 侧的复压过流保护整定计算

(1) 低电压启动元件的整定计算

$$U_{op} = 0.9U_e / (K_{rel} \cdot K_r) =$$

$$0.9 \times 100 \text{ V} / (1.15 \times 1.118) = 70 \text{ V}$$

式中： K_{rel} 为可靠系数，取 1.1~1.2； K_r 为返回系数，取 1.05~1.25； U_e 为 PT 二次侧的额定线电压，取为 100 V。

(2) 负序电压启动元件的整定计算

负序电压启动元件应躲过正常运行时出现的不平衡电压，不平衡电压值可实测确定。当无实测值时，根据现行规程的规定取：

$$U_{op2} = (0.06 \sim 0.08)U_e = 3.5 \sim 4.6 \text{ 取为 } 4 \text{ V}$$

式中： U_e 为 CT 二次侧额定相电流 $100/\sqrt{3}$ 。

(3) 低电压元件和负序电压元件灵敏度校验

由于变压器三侧均装设了低电压和负序电压启动元件，三侧的电压启动元件构成或的关系，只要有一侧满足条件就可以启动，因此低电压和负序电压启动元件的灵敏度一定满足条件。

(4) 过电流元件的整定计算

a) 过电流保护的的动作电流计算。电流元件的动作电流应躲过变压器的额定电流，计算公式如下：

$$I_{op} = (K_{rel} / K_r) I_e =$$

$$(1.25/0.85) \times 0.590 = 0.868 \text{ A}$$

式中： K_{rel} 为可靠系数，取 1.2~1.3； K_r 为返回系

数，取 0.85~0.95； I_e 为变压器 220 kV 侧额定电流。

b) 灵敏度校验

$$K_{sen} = I_{k,min}^{(2)} / I_{op}$$

式中： $I_{k,min}^{(2)}$ 为后备保护区末端两相金属性短路时流过保护的最小短路电流。要求 $K_{sen} \geq 1.3$ 。

规程要求 220 kV 侧高压侧的复压过流保护作为 110 kV 侧和 10 kV 侧母线发生相间短路故障的近后备，具体整定计算如下：

(1) 110 kV 侧发生相间短路

#1、#2 两变并列运行，系统采用最小运行方式，流过故障点的总短路电流为：

$$I_{dmin}^{(2)} = 0.866 \times 251 \div (0.01446 + (0.08117 - 0.00356) \parallel (0.08178 - 0.00394)) = 4076.6 \text{ A}$$

$$\#1 \text{ 变 } I_{dmin1}^{(2)} = 4076.6 \times 0.07784 \div (0.07761 +$$

$$0.07784) = 2041.3 \text{ A}$$

$$\#2 \text{ 变 } I_{dmin2}^{(2)} = 4076.6 - 2041.3 = 2035.3 \text{ A}$$

式中：符合“ \parallel ”为求并联阻抗值。

$$K_{sen} = 2035.3 \div 800 \div 0.868 = 2.93 > 1.3$$

(2) 10 kV 侧发生相间短路时

#1、#2 两变同时运行时，系统最小运行方式下，#2 主变 10 kV 侧发生两相短路时(两相短路，在变压器高压侧有一相电流相当于三相短路值)总短路电流为：

$$I_{dmin}^{(2)} = I_{dmin}^{(3)} = 251 \div [0.01446 + (0.08117 - 0.00356 - 0.00394) \parallel 0.08178 + 0.20883] = 957.8 \text{ A}$$

流过#2 变压器 220 kV 侧保护安装处的最小相间短路电流为：

$$I_{dmin2}^{(2)} = 957.8 \times 0.07367 / (0.07367 + 0.08178) = 453.8 \text{ A}$$

流过#1 变压器高压侧保护安装处的最小相间短路电流：

$$I_{dmin1}^{(2)} = 957.8 - 453.8 = 504 \text{ A}$$

$$K_{sen} = 453.8 \div 800 \div 0.868 = 0.653 \leq 1.3$$

以上表明：220 kV 侧复压过流保护对 110 kV 侧相间短路有足够的灵敏度，对 10 kV 侧相间短路灵敏度不够。

1.2.2 110 kV 侧的复压过流保护装置整定计算整定计算

低电压和负序电压整定计算过程与 220 kV 侧相同，电流元件的整定计算如下：

a) 过电流保护的的动作电流计算

$$I_{op} = (K_{rel} / K_r) \times I_n = (1.25 / 0.85) \times 0.753 = 1.11 \text{ A}$$

b) 灵敏度校验

(1) 110 kV 侧母线发生相间短路, #1, #2 变中压侧并列运行, 流过故障点的总短路电流:

$$I_{dmin}^{(2)} = 0.866 \times 502 \div [0.01446 + (0.08178 - 0.00394) \parallel (0.08117 - 0.00356)] = 8153 \text{ A}$$

流过#2 变中压侧的短路电流:

$$I_{dmin2}^{(2)} = 8153 \times \frac{0.07761}{0.07761 + 0.07784} = 4070 \text{ A}$$

灵敏度校验:

$$K_{sen} = 4070 \div 1200 \div 1.11 = 3.05 \geq 1.3$$

(2) 10 kV 侧发生相间短路

#1、#2 变中压侧并列运行, 系统最小运行方式下, #1 变 10 kV 侧母线发生相间短路(两相短路, 在变压器中压侧有一相电流相当于三相短路值), 流过故障点的总短路电流为:

$$I_d^{(2)} = I_d^{(3)} = 502 \div [0.01446 + 0.08117 \parallel (0.08178 - 0.00356 - 0.0039) + 0.2093] = 1911.78 \text{ A}$$

流过主变中压侧保护安装处的短路电流为:

$$I_{dmin}^{(2)} = 1911.78 \times 0.08117 / (0.08117 + 0.08178 - 0.00356 - 0.00394) = 998.27 \text{ A}$$

灵敏度校验:

$$K_{sen} = 998.27 \div 1200 \div 1.11 = 0.75 \leq 1.5$$

以上表明: 110 kV 侧复压过流对 110 kV 侧相间短路有足够的灵敏度, 对 10 kV 侧灵敏度不够。

通过以上计算可知: 220 kV 和 110 kV 侧的复压过流保护对 10 kV 侧相间短路灵敏度都不够。

按照《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》“当电流、电压保护不能满足灵敏度的要求时, 变压器的相间故障后备保护可采用阻抗保护”, 在#2 变压器 220 kV 侧配置相间阻抗保护。

1.2.3 相间阻抗保护的整定计算如下

(1) 变压器 220 kV 侧阻抗计算

#2 变压器电抗的计算:

$$X_1 = 0.08178 \times 230^2 \div 100 = 43.26 \ \Omega$$

$$X_2 = -0.00394 \times 230^2 \div 100 = -2.08 \ \Omega$$

$$X_3 = 0.20883 \times 230^2 \div 100 = 110.47 \ \Omega$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 分别为变压器高、中、低压侧电抗值。

#2 变压器电阻的计算, 由#2 变压器的短路损耗可计算出三侧电阻:

$$R_1 = 0.467 \ \Omega, R_2 = 0.277 \ \Omega, R_3 = 1.575 \ \Omega$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 为#2 变高、中、低压侧电阻。

(2) 变压器 220 kV 侧阻抗保护整定计算

相间阻抗保护的整定按照对侧母线短路满足灵敏度要求的条件计算:

$$Z_{op} = K_{sen} Z_t$$

式中: K_{sen} 为阻抗保护灵敏系数, 取 1.3; Z_t 为变压器阻抗;

变压器的电抗分量整定:

$$X = 1.3 \times (43.26 + 110.47) \times 800 / 2200 = 72.7 \ \Omega$$

变压器的电阻分量整定:

$$R = 1.3 \times (0.476 + 1.575) \times 800 / 2200 = 0.969 \ \Omega$$

(3) 变压器阻抗保护灵敏系数校验

按对侧母线三相短路校验, 如下式:

$$K_{sen} = Z_{op} / Z_t = 1.3$$

阻抗整定是按照高压侧和低压侧的阻抗之和整定的。如果#1 变压器和#2 变压器的 110 kV 母线并联运行, 就有#1 变压器中压侧的助增电流流入#2 变压器, 必然对低压侧产生一个助增电流, 使 Z_t 增大, 使 $K_{sen} < 1.3$, 只要 110 kV 母线并联运行就会使灵敏度不满足要求。

通过以上分析可知复压过流和阻抗保护都不能满足变压器相间短路后备保护灵敏度的要求。

2 不完全差动保护

2.1 不完全差动保护原理

不完全差动保护是利用变压器高、中压侧电流的相量和, 直接反映低压侧电流值的一种变压器后备保护^[4], 其保护范围不仅延伸到低压侧引线及母线和相邻线路, 而且还包括了变压器本身。正常运行时, 流过该保护的电流 $I_d = |I_H + I_M|$, 它实际反映的是变压器电源侧提供给低压侧的负荷电流。不完全差动保护逻辑框图如图 2 所示。

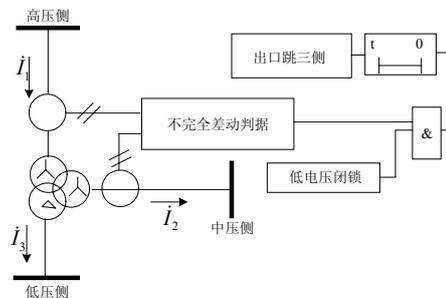


图 2 不完全差动保护原理框图

Fig.2 Principle diagram of incomplete differential protection

2.2 不完全差动保护整定计算

不完全差动保护的整定计算方法与完全差动基本相同，只是要在动作量和制动量中去掉低压侧电流，不完全差动保护的最小启动电流应躲过低压侧额定电流来整定^[5]，不完全差动保护比率制动曲线^[6-7]如图3所示。

1) 动作电流和制动电流的计算方法

$$I_{dz} = \sum_{i=1}^N \dot{I}_i; \quad I_{zd} = \frac{1}{2} \left| \dot{I}_{\max} - \sum_{i=1}^{N-1} \dot{I}_i \right|$$

式中： N 为除去主变低压侧的主变的侧数； \dot{I}_{\max} 为除去主变低压侧的所有侧中的最大相电流； $\sum_{i=1}^{N-1} \dot{I}_i$ 为除去主变低压侧的其他侧（除最大相电流侧）相电流之和^[8]。

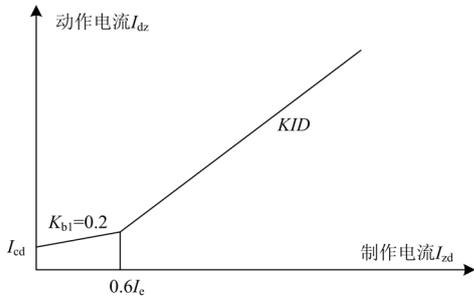


图3 不完全差动保护比率特性曲线

Fig.3 Ratio characteristic curve of incomplete differential protection

2) 不完全差动保护动作判据如下

$$I_{zd} \leq 0.6I_e \text{ 时: } I_{dz} \geq K_{b1} I_{zd} + I_{cd}$$

$$I_{zd} > 0.6I_e \text{ 时:}$$

$$I_{dz} \geq KID(I_{zd} - 0.6I_e) + K_{b1} \times 0.6I_e + I_{cd}$$

其中： I_{cd} 为差动保护电流定值； I_{dz} 为动作电流； I_{zd} 为制动电流； K_{b1} 为第一段折线的斜率（固定取为0.2）； KID 为第二段折线的斜率，其值等于比例制动系数定值^[9-10]。

3) 整定计算过程如下

低压侧额定电流为 $I_{le}=4\ 948.7\text{ A}$ ，折算到高压侧为 236.188 A ，高压侧的额定电流为 $I_e=472.4\text{ A}$ ，不完全差动保护的启动电流整定为：

$$I_{cd} = K_{rel} I_{le} = 1.3 I_{le} = 1.3 \times \frac{1}{2} I_e = 0.65 I_e$$

中压侧外部故障时，流过靠近故障点侧电流互感器的最大短路电流周期分量计算：

$$\begin{aligned} \text{两变运行时流过故障点的总短路电流为} \\ I_{dz\max}^* = 1/[0.00712 + (0.08117 - 0.00356) \parallel \\ (0.08178 - 0.00394)] = 21.7474 \end{aligned}$$

流过#1 变压器的短路电流为

$$I_{d1\max}^* = 21.747 \times [0.07784 / (0.07784 + 0.07761)] = 10.89$$

#1 变压器单台运行：

$$I_{dd\max}^* = 1 / (0.00712 + 0.08117 - 0.00356) = 11.802$$

取 $I_{d\max}^*$ 为 11.802

$$I_{d\max} = 11.802 \times 251 / 800 = 3.7029\text{ A}$$

$$I_{bp\max} = (K_{ap} K_{cc} K_{er} + \Delta U + \Delta m) I_{d\max}$$

式中： K_{ap} 为非周期分量系数，取2.0； K_{cc} 为电流互感器的同型系数，取1.0； K_{er} 为电流互感器的比误差，取0.1； ΔU 为变压器调压引起的误差，取0.12； Δm 为由于电流互感器变比未完全匹配产生的误差，取0.05。

$$I_{bp\max} = (2 \times 1 \times 0.1 + 0.12 + 0.05) \times 3.7 = 1.369\text{ A}$$

$$I_{dz\max} = K_{rel} I_{bp\max} = 1.5 \times 1.369 = 2.0535\text{ A}$$

$$I_{zd\max} = I_{d\max} = 3.7029\text{ A}$$

$$KID = (I_{dz\max} - I_{cd} - 0.12 I_e) / (I_{zd\max} - 0.6 I_e) = 0.4775$$

取 $KID = 0.5$

4) 不完全差动保护灵敏度校验

220 kV 变压器三侧绕组容量比为 100/100/50，高、中压侧的复压过流元件是按躲本侧额定电流整定的，而不完全差动保护的最小动作电流是按躲低压侧额定电流整定的，由于低压侧容量为50%，额定电流值会小一半（折算至同一侧）。同时，在变压器内部或低压侧外部短路的情况下，流过不完全差动保护的动作为高、中压侧电流之和（ $I_H + I_M$ ），要大于两侧过流保护分别通过的本侧短路电流（ I_H 或 I_M ），显然不完全差动保护的灵敏度要高得多。

在主变中压侧并列运行的方式下，不仅不会像普通高压侧复压过流保护那样，低压侧发生故障时，因中压侧的分流，造成在高压侧保护装置中的故障电流比单台主变运行或主变三侧都分裂时低压侧发生故障在保护装置中的故障电流小得多的现象，反而因主变中压侧并列运行使不完全差动保护装置感受到的和电流亦有所增加，这一增一减，导致不完全差动保护的灵敏度比普通过流的灵敏度大为提高，实例验证如下：

(a) 变压器单变运行时

#1 变压器单台运行，在最小运行方式下，低压侧发生两相短路时，最小短路电流为

$$I_{d\min}^{(2)} = 0.866 \times 251 \div (0.01446 + 0.08117 + 0.20933) = 712.8\text{ A}$$

折算到 CT 二次侧为: $712.8/800 = 0.891 \text{ A}$

$$I_{zd} = 0.5 \times 0.891 = 0.4455 \text{ A}$$

$$I_{dz} = 0.5 \cdot (0.4455 - 0.6 \times 0.59) + 0.2 \times 0.6 \times 0.59 + 0.65 \times 0.59 = 0.500 \text{ A}$$

$$K_{sen} = I_{dmin}^{(2)} / I_{dz} = 0.891 / 0.500 = 1.7820 > 1.5$$

满足灵敏度要求。

(b) 变压器并列运行时, 通过计算可知

在最小运行方式下, #2 变压器低压侧发生两相短路时, 流过#2 变高压侧的电流为 393 A, 流过#2 变中压侧的电流为 436.5 A, 流过不完全差动保护的电流为 $393+436.5=829.5 > 712.8$, 即主变并列运行时, 不完全差动保护的灵敏度更高。

2.3 动作时限整定

高、中压侧复压过流整定时, 其动作时间要与本侧线路保护配合, 动作时间较长, 超过变压器安全运行的要求^[11] (变压器技术规程规定: 低压母线或出口对称短路时, 通过变压器短路电流的时间不应大于 2 s), 而不完全差动保护的时限只需与变压器低压侧复压过流的时限配合, 因变压器低压侧多为直馈线, 保护配合时间短, 所以不完全差动保护切除故障会更快一些 (可不超过 2 s)。

3 结论

通过上述分析可知, 不完全差动保护既能弥补高、中压侧保护作为低压侧后备保护灵敏度不足的缺陷, 又能在动作时间上满足变压器稳定的要求, 并且在现有的微机主变保护装置上添加其功能非常方便, 不需增加任何硬件, 只需在软件设计上将比率差动的程序稍作修改便可使用, 是一种原理简单、更加易于实现的变压器后备保护。

值得强调的是, 不完全差动保护应用于大电流接地系统中时, 引入电流应采用两相电流差或 CT 二次绕组接成三角形接法, 以滤除其中的零序分量, 防止区外发生接地故障时, 引起该保护的误动作。

参考文献

- [1] 都基丰, 迟主升, 王桂平. 220kV 高阻抗电力变压器设计新方案[J]. 电力设备, 2004, 5(6): 21-24.
DU Ji-feng, CHI Zhu-sheng, WANG Gui-ping. New Design of 220 kV High Impedance Power Transformer[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(6): 21-24.
- [2] 乐启昌, 等. 高阻抗变压器的应用[J]. 黑龙江电力, 2001, 23(6): 442-445.
LE Qi-chang, et al. Application of High Impedance Transformer[J]. Heilongjiang Electric Power, 2001, 23(6): 442-445.

- [3] DL/T 684-1999, 大型发电机变压器继电保护整定计算导则[S].
DL/T 684-1999, Guide of Calculating Settings of Relay Protection for Large Generator and Transformer[S].
- [4] 文杰. 关于变压器不完全差动保护的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 22(6): 48-49.
WEN Jie. Study on Incomplete Differential Protection of Transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 22(6): 48-49.
- [5] 常凤然, 张洪, 周记录, 等. 变压器和电流保护的性
能分析[J]. 继电器, 2001, 29(1): 16-19.
CHANG Feng-ran, ZHANG Hong, ZHOU Ji-lu, et al. Analysis on the Characteristics of Sum Current Protection for Transformer[J]. Relay, 2001, 29(1): 16-19.
- [6] Habib M, Marfn M A. A Comparative Analysis of Digital Relaying Algorithms for the Differential Protection of Three Phase Transformers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 13(3).
- [7] Guzman A, Zocholl S, Benmouyal G, et al. A Current-based Solution for Transformer Differential Protection, Part II[J]. IEEE Trans Power Del, 2002, 17(4): 886-893.
- [8] GB/T 14288-2006, 继电保护和自动装置技术规程[S].
GB/T 14288-2006, Technical Code for Relaying Protection and Security Automatic Equipment[S].
- [9] CSC-326 系统数字式变压器保护装置说明书[Z].
Specification of CSC-326 Microprocessor-based Transformer Protection[Z].
- [10] WHB-801A/P 微机变压器保护装置说明书[Z].
Specification of WHB-801A/P Microprocessor-based Transformer Protection[Z].
- [11] DL/T 559-2007, 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
DL/T 559-2007, Setting Guide for 200 kV~750 kV Power System Protection Equipment[S].

收稿日期: 2009-03-01; 修回日期: 2009-03-27

作者简介:

贺元康 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究; E-mail: jacob1890@163.com

姜山 (1987-), 男, 本科生, 主要从事电力系统稳定与控制方面的研究;

郑州 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护方面的研究。