

华北电力大学

专业硕士学位论文

220kV 变电站电流互感器配置及其应用方案
优化

220 kV Current Transformer Substation
Configuration and Application Scheme Optimization

徐其航

2014 年 12 月

国内图书分类号：TM933
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

专业硕士学位论文

220kV 变电站电流互感器配置及其应用方案 优化

硕 士 研 究 生：徐其航

导 师：徐玉琴 教授

企 业 导 师 朱萍 高工

申 请 学 位：工程硕士

专 业 领 域 电气工程

培 养 方 式 全日制

所 在 学 院：电气与电子工程学院

答 辩 日 期：2015 年 3 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM933

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**220 kV Current Transformer Substation
Configuration and Application Scheme Optimization**

Candidate:	Xu Qihang
Supervisor:	Prof. Xu Yuqin
School:	School of Electrical and Electronics Engineering
Date of Defence:	March, 2015
Degree-Confering-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《220kV 变电站电流互感器配置及其应用方案优化》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：日期： 年 月 日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《220kV 变电站电流互感器配置及其应用方案优化》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名：日期： 年 月 日

导师签名：日期： 年 月 日

摘 要

随着电力系统的发展，电力系统电压等级和电气设备自动化程度的提高，尤其电力系统继电保护技术向计算机化、网络化、智能化和通信一体化的方向发展，互感器的输出要求数字化，如何实现互感器的模拟量就地数字化传输，且不存在容量问题，同时，如何根据不同的变电站，因地制宜，选取最优配置的互感器，寻求最优化方案，都是本文研究的重点，对于节约成本，提高经济效益有着重大的现实意义。结合智能化变电站的发展需要，探讨解决电子式互感器在变电站中的应用问题，对变电站数字化发展必将起到一定的积极作用。

传统电磁式电流互感器因其存在固有的磁饱和现象，分析其在保护应用中存在的问题。并介绍了电子式互感器的应用特点及它们对保护的影响。

本文提出 220kV 永定河变电站互感器工程应用方案；全站采用常规互感器，通过“常规互感器+合并单元”模式实现就地数字化采样。论述了互感器选型、安装方式、合并单元配置等方案，并重点对应用“常规互感器+合并单元”实现就地数字化采样以及对常规互感器进行“减组降容”实施方案进行了分析探讨；将“常规互感器+合并单元”模式应用到此变电站中，减少了二次侧二次绕组的数量，降低了互感器的高度，减小了体积，从而减小变电站占地面积，经济效益显著。

新型电子式互感器的应用可以克服传统互感器存在的隐患，这对于今后智能变电站的发展有着重大的实际参考意义。结合一工程实例，提出电子式互感器的布置应遵守节约占地原则、电子设备地电位安装原则，合并单元宜安装于室内。提出了主变中性点设备新型接线方案，解决了有源电子式互感器的供电问题。分析了电子式互感器的数字饱和对继电保护的影响，提出了相应对策。

关键词：互感器；继电保护；合并单元；二次绕组；

Abstract

Along with the development of the power system, power system voltage level and improvement of electrical equipment automation, especially power system relay protection technology to the integration of computer, network, intelligence and communication in the direction of development, the digital transformer output requirements, how to realize the digital analog in situ transmission of transformer, and there is no capacity problem, at the same time, according to different substation, adjust measures to local conditions, select the optimal configuration of the transformer and to seek optimal solution, is a focus in the study of this article, for cost savings, improve the economic benefit has great realistic significance. To meet the needs of the development of intelligent substation, solve the problem of electronic instrument transformer application in transformer substation, the transformer substation digitization development will certainly play a positive role.

Because of its inherent magnetic saturation phenomenon of traditional electromagnetic current transformer, analyzes the problems existing in the application in protection. And introduced the application of electronic transformer characteristics and their influence on protection.

This chapter puts forward 220 kV yongding river transformer substation engineering application solutions; total station with conventional transformer, through the "conventional transformer + merging unit" pattern implementation on the digital sampling. Discusses the selection of the transformer, such as installation, merge unit configuration scheme, and focusing on "conventional transformer + merging unit" is applied to implement digital sampling and in situ was carried out on the conventional transformer "reduced set of reduced capacity" and the implementation of the grounding scheme has carried on the analysis discussion; Incorporating "conventional transformer + merging unit" model is applied to the transformer substation, reduce the number of secondary winding of secondary side, reducing the height of the transformer, reduced volume, thus reduce the substation area, the economic benefit is remarkable.

The application of new type of electronic transformer can overcome the hidden trouble existing in the traditional transformer, and for the future development of smart substation has significant practical reference significance. Combined with an engineering example, this paper put forwards the arrangement of electronic transformer shall comply with the following principles: saving the land occupied by the substation; electronic equipment should be placed on the side of the earth potential. Merging unit should be installed in the interior. Put forwards a new type

connection scheme of main transformer neutral point equipment, solves the power supply problems of active type electronic transformer. This article analyses the influence on relay protection when the electronic transformer is in a digital saturated state, put forwards the corresponding countermeasures.

Keywords: transformer; relay protection; merging unit; secondary winding;

目 录	
摘 要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 互感器的研究背景	1
1.2 电子式互感器分类	1
1.2.1 有源型 ECT.....	2
1.2.2 无源型 ECT.....	2
1.3 电子式互感器应用情况及存在的问题	3
1.4 本文的主要研究内容	3
第 2 章 互感器的应用特点及对保护的影响	5
2.1 电磁式 CT 应用中存在的问题	5
2.2 电子式电流互感器的应用特点	5
2.3 对保护原理可靠性的影响	6
2.4 对线路距离保护的影响	7
2.5 对纵联方向(距离)保护的影响	7
2.6 对纵联差动保护的影响	7
2.6.1 CT 和 ECT 纵联差动保护比率制动特性对比分析	7
2.7 本章小结	9
第 3 章 永定河 220kV 变电站互感器选择及优化.....	10
3.1 常规方式互感器“减组降容”原因	10
3.2 “常规互感器+合并单元”模式“减组降容”可行性分析	10
3.3 永定河变互感器二次绕组“减组”方案	23
3.3.1 220kV 部分二次绕组配置	23
3.3.2 110kV 部分二次绕组配置.....	25
3.3.3 35kV 部分二次绕组配置	27
3.3.4 常规互感器数字化采样方式“降容”技术	28
3.3.5 永定河变互感器二次绕组“降容”方案	30
3.4 永定河变互感器配置方案	31
3.5 本章小结	31
第 4 章 承德市区南 220kV 变电站互感器选型方案.....	33

4.1 电子式互感器选型与配置方案	33
4.1.1 110kV 及 220kV 电流互感器选型	33
4.1.2 35kV 及主变中性点电流互感器选型	33
4.1.3 电子式互感器配置方案	35
4.1.4 电子式互感器线圈（传感元件）配置原则	35
4.2 合并单元的配置	37
4.2.1 合并单元与电子式互感器的接口	37
4.2.2 合并单元安装位置	38
4.2.3 合并单元的同步方案	38
4.2.4 合并单元对不同采样精度装置的适应性分析	40
4.3 电子式互感器应用若干问题分析	42
4.3.1 主变中性点 ECT 安装方式优化	42
4.3.2 ECT 数字饱和时的继电保护对策	43
4.4 本章小结	44
第 5 章 结论与展望	45
参考文献	47
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	50
致 谢	51

第 1 章 绪 论

1.1 互感器的研究背景

随着电力系统电压等级的提高,传输容量和距离的增加,当前变电站普遍安装使用的高电压等级的传统电磁式互感器存在很多致命缺陷:传统的油浸电磁式互感器运行时存在许多安全性问题,从而易引起短路等故障^[1];随着互感器电压等级的提高,绝缘问题亟待解决,从而导致体积增大,变的笨重,增大了占地面积;传统的电磁式互感器采用铁芯绕组,发生短路故障时,当短路电流过大时,铁芯饱和,互感器不能正确传变暂态过程电流;它对二次侧负载也有比较严格的要求,二次负载过大,测量精度就会降低,并且运行维护工作量大,定期要对其进行绝缘油化验、测介质损耗和解决漏油问题等^[2]。

国外早在上个世纪 60 年代就开始研究电子式互感器^[3],但局限于当时的技术水平,电子式互感器的测量精度和温度特性都不能满足运行要求,处于理论探索阶段^[4]。直到上个世纪 90 年代,电子式互感器才从理论探索阶段进入到实用化阶段,并逐步应用到高压、超高压、特高压工程中去。世界上很多电力企业和公司纷纷投入大量人力物力去研究电子式互感器,探究它的可靠性、准确性^[5],使它更实用化、普遍化,以占领市场。

以 1982 年在上海召开的“激光工业应用座谈会”为起步,上个世纪 80 年代我国对电子式互感器开始探索^[6]。直到 1991 年,清华大学和中国电力科学院共同研制的 110kV 的无源 ECT^[7-8]挂网试运行和南自公司在 2004 年研制成功的有源 ECT 挂网运行,标志着我国电子式互感器已逐步进入实用化阶段^[9]。清华大学、华中科技大学、华北电力大学、西安交通大学、大连理工大学、国电南瑞公司、南瑞继保、许继等公司也进行了相应的研究。其中,南瑞航天电气公司成功研制全光纤电子式电流互感器^[10],通过了型式实验,准确度和可靠性都达到了运行要求,这标志着我国电子式互感器已进入了实用化阶段,但是电子式互感器的技术还不太成熟,实用化进程中还面临着很多技术上的困难^[11-12]。

1.2 电子式互感器分类

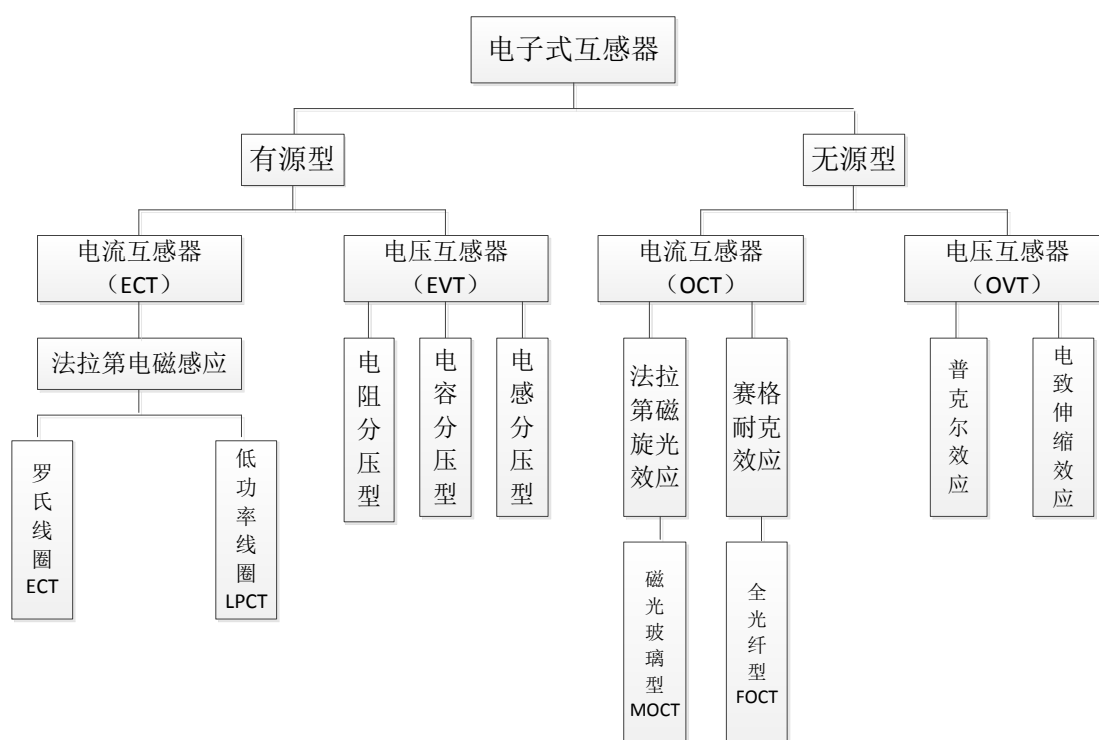


图 1-1 电子式互感器的分类

1.2.1 有源型 ECT

有源型 ECT 一般由高压侧部分，光纤传输部分和低压侧部分三部分组成^[13-14]。高压侧部分负责对一次电流进行采样，经放大、调制、电光转换形成光信号，经光纤传输部分传到低压侧，经过光电转换形成电信号，最后经一系列信号处理输出。这里，光纤传输通道是连接高低压侧的媒介^[15]。

1.2.2 无源型 ECT

无源电子式互感器分为光学玻璃型 ECT 和全光纤型 ECT^[16]。光学玻璃型 ECT 原理上基于法拉第磁旋光效应，与全光纤型 ECT 相比，稳定性好，精确度高，受线性双折射效应影响小^[17-18]，其灵敏度主要受 Verdet 常数大小的选取，Verdet 常数越大，灵敏度越高，但是由于 Verdet 常数温度特性比较差，从而决定了 Verdet 常数也不能取值过大^[19]。全光纤型电子式互感器原理上基于法拉第

磁光效应和磁致伸缩效应而研制的，但由于温度和振动对全光纤 ECT 内部的线性双折射效应影响比较大，从而制约了全光纤 ECT 的实用化发展^[20]。

1.3 电子式互感器应用情况及存在的问题

借助国家电网公司 2009-2010 年规划开展的智能变电站试点工程，电子互感器在智能化试点变电站中得到广泛应用^[21-22]。根据国网电科院《2011 年电子式互感器调研报告》，国网公司 110(66)kV 及以上电子式互感器装用情况如下表 1-1 所示：

表 1-1 电子式互感器装用情况

互感器（按类型划分）	数量（台）	占在运同功能互感器百分比
电子式电流互感器	1359	0.45%
电子式电压互感器	411	0.32%
电子式组合电流电压互感器	271	0.34%
电子式互感器	2041	0.48%

作为智能变电站的重要设备，电子互感器在采集数字化、控制网络化、设备紧凑化、状态可视化、检修状态化等方面发挥了重要的作用，但也因运行时间相对较短、技术还未完全成熟，在实际应用中稳定性、可靠性相比常规互感器较低^[23]。电子式互感器存在的问题有：长期可靠性、采集器故障、传感器故障、光纤故障、电磁干扰和振动等，如何根据不同的变电站，因地制宜，选取不同配置的互感器，寻求最优化方案，是本文研究的重点，对于节约成本，提高经济效益有着重大的现实意义。

1.4 本文的主要研究内容

本文是以互感器为研究对象，分析互感器对保护的影响，根据变电站的不同要求选择不同的互感器，罗列出许多不同的配置方案，经过对比分析，最后给出一套互感器最优配置方案。

(1)阐述目前国内外电子式互感器发展和研究现状，介绍了互感器的分类，陈述了论文的主要工作。

(2)基于传统互感器的缺陷，电子式互感器有其独特的优越性，制作了比率特性曲线定性对比分析两种互感器对线路差动保护的影响。

(3)结合永定河 220kV 变电站实例，从当地经济、运行经验角度考虑，全站仍装设常规互感器，为了进一步降低变电站的造价，采用“常规互感器+合并单

元”模式，最后给出“常规互感器+合并单元”模式下互感器最优配置表。

(4)承德市区南 220kV 变电站采用电子式互感器，介绍了合并单元与电子式互感器的接口、合并单元的安装位置、合并单元采样信号同步及合并单元对不同采样精度装置的适应性，最后分析了电子式互感器在应用过程中遇到的问题并给出了解决方案。

(5)对论文进行总结，并提出进一步研究工作的展望。

第 2 章 互感器的应用特点及对保护的影响

2.1 电磁式 CT 应用中存在的问题

传统的电磁式电流互感器采用的是铁芯线圈构成,从而克服不了固有铁芯的饱和问题^[24],电磁式电流互感器应用到差动保护中,当发生短路时,短路电流很大,由于它存在磁饱和现象,传变到二次侧的电流会发生畸变,这样就有可能造成继电保护装置误判,发生拒动或误动^[25]。在另一种情形下,当变压器空载合闸时,由于变压器的铁芯饱和,必将产生励磁涌流,励磁涌流中除基波分量外,还存在大量的非周期分量和高次谐波分量^[26],此时产生的电流可能是额定电流的几倍之多,由于电磁式电流互感器无法测量非周期分量电流,就使得二次侧所测电流的特性发生了改变,可能造成保护的误动作。另一方面,在距离保护中^[27],由于传统电磁式电流互感器固有测量误差和磁饱和现象,直接影响测量阻抗的测量准确度,使继电保护范围缩小。

2.2 电子式电流互感器的应用特点

电子式电流互感器在传变特性上具有频带宽、测量精度高、抗电磁干扰能力强、不存在饱和现象的优点,不仅能满足电力系统发展要求,而且也符合新型数字化保护发展的需要,具有广阔的应用前景^[28-29]。

电流差动保护原理建立在基尔霍夫电流定律的基础之上,具有良好的选择性^[30],能灵敏快速地切除保护区内的故障,被广泛地应用在能够方便地取得被保护元件两端电流的发电机保护、变压器保护、大型电动机保护中。流过差动继电器的电流是电流互感器的二次侧电流之和,当正常运行和保护区外故障时,保护装置不动作。当保护区故障,流过差动继电器的电流超过整定值时^[31-32],保护动作。由于电磁式电流互感器存在磁饱和现象,当发生保护区外故障时,非周期分量的影响^[33],流过电流互感器的不平衡电流增大,可能导致保护误动作。但是如果安装的是电子式电流互感器,由于不存在饱和现象,能正确传变二次侧电流,就避免了保护的误动作,提高了保护的稳定性^[34]。

传统电磁式电流互感器存在固有的磁饱和现象,不能准确传变故障电流的非周期分量和谐波分量,因此需要装设一些保护附加判据^[35-36],来提高保护的可靠性,这样一来就使得保护变的繁琐和复杂,为保护装置的误动和拒动埋下了隐患。而新型的电子式互感器测量精度高,频率响应宽,不存在饱和现象,能准确测量

故障电流的非周期分量和谐波分量^[37]，从而在一定程度上简化了保护判据。

随着电压等级的提高和电网结构越来越复杂化，保护装置能快速发现故障精确地传变故障电流，并能准确地做出动作是智能化发展的关键所在。但由于传统电磁式互感器固有的测量误差和饱和问题，不能保证测控系统的准确性，当线路发生短路故障时，流过电流互感器两端的电流大大增加^[38]，极大可能使电流互感器达到饱和，引起测量误差，导致保护误动作。而采用电子式互感器后，由于它频率响应宽，无饱和，能准确测量故障电流中的非周期和谐波分量，这无疑在很大程度上提高了测量的准确性。不仅提高了距离保护的动作速率，而且对距离保护的阻抗元件、选相元件的动作精度都有较大的改善^[39-40]。

故障录波装置主要装设在发电厂、高电压等级的重要变电站里，便于分析电力系统故障和保护装置在故障过程中的动作情况，是电力系统分析事故的重要参考设备^[41]。可以根据录波装置记录的波形和数据，去分析和推算一次侧电流电压的大小，由此算出故障点的位置，节约了大量的巡线时间，对及时恢复供电有重要意义。与传统电磁式互感器相比，电子式互感器有其绝对的优势，频率响应宽，测量精确度高，无饱和问题，既能很好的再现非周期分量，又能准确的真实的反映高次谐波含量，暂态精度和稳态精度都可以达到 0.2S，明显提高了故障录波的可靠性。

2.3 对保护原理可靠性的影响

随着智能变电站数字化的发展，保护原理不再仅局限于当前，一些新原理和算法也在日新月异的更替着。目前有很多保护原理都是基于电流的基波分量，而高次谐波必须滤除掉，滤波就会造成延迟，不能使保护装置在第一时间做出正确的动作。而采用电子式互感器后，由于它测量准确度高，无饱和，非周期分量和高次谐波分量都能准确地还原，因此许多测量功能均可在保护中实现。由于频率响应好，故障初瞬间和断路器预分合时刻的波形都能真实的记录下来^[42]，从而具有录波和开关状态监视的功能。

传统电磁 CT 的饱和问题直接决定了保护能否正确动作。比如在差动保护中，当区外故障时，由于饱和问题而产生的不平衡电流可能会导致保护的误动作。此外，在发生故障的故障点处短路电流比较大，常规的电磁式互感器可能已经饱和，不能传变一次侧故障电流，导致保护拒动。电子式电流互感器无饱和问题，能正确测量故障电流并保持良好的线性，提高了保护动作的可靠性。

2.4 对线路距离保护的影响

电流互感器和电压互感器的测量误差均将引起阻抗继电器端子电流和电压的数值误差及相角误差，从而影响阻抗测量的精确性，可能引起距离保护误动。一般情况下，将缩小距离保护的保护区；故障情况下，传统电磁互感器易饱和，容易引起保护误动^[43]。此外，由于电磁式互感器不能够准确有效地传变非周期性分量，引起测量阻抗和故障测距产生较大的误差，当前解决方法是通过增大数据窗来减小误差，而这必将影响距离保护的速动性。智能化变电站采用ECT将大大提高距离保护起动元件、选相元件、阻抗元件等的动作精确度，同时为故障录波和故障测距都提供了良好的测量基础。

2.5 对纵联方向(距离)保护的影响

纵联方向(距离)保护只需得到对侧判断为正方向的信号，两侧数据不同步只会造成延时短的一侧等待对侧信号几个毫秒。考虑到通道本身以及其他环节也会造成延时，所以这个小延时有纵联方向(距离)保护的正确动作不会形成影响。

2.6 对纵联差动保护的影响

电流差动保护原理是建立在基尔霍夫电流定律的基础上，即在任何时刻，对任一结点，所有流出结点的支路电流的代数和恒等于零。差动保护就是利用被保护原件两侧电流和在保护区内短路与区外短路时一个是短路点电流很大，一个几乎为零的差异而构成的。当发生保护区外短路故障时，流过差动继电器的电流是电流互感器的二次侧电流之和，理论上此电流之和为零，保护不动作。

但输电线路两侧所装设的互感器特性、变比和测量误差难免不一致，再加上比较大的短路电流和非周期分量的影响，励磁电流增大，此时产生的不平衡电流就比较大，可能造成保护误动作。

与此同时，电流差动保护是实时比较输电线路两端电流数据，假如输电线路两端的电流不是同时测量所得，即使相差很短的时间，也会有相角差，从而增大了不平衡电流，如果超过整定值，就会造成保护的误动作^[44]。电子式互感器无饱和，能准确传变一次大电流中的非周期分量和谐波分量，暂态特性好，产生的不平衡电流小。

2.6.1 CT 和 ECT 纵联差动保护比率制动特性对比分析

应用ECT构成的差动保护，在理想情况下是没有不平衡电流的，但是由于互

传感器的测量误差，不平衡电流仍然存在，因此可以对原有比率制动特性的整定加以优化，把分布电容的影响考虑进去，仍采用二段式比率制动特性，具体分析如下：

(1)最小动作电流 $I_{set-min}$ 。当对差动保护进行整定时，其动作电流的整定需躲过外部短路时的最大不平衡电流和躲过最大负荷电流，取以上两个整定值中较大的一个。如果按照躲过外部短路时的最大不平衡电流整定，则整定公式为：

$$I_{set-min} = K_{rel} K_{np} K_{er} K_{st} I_{k-max} \quad (2-1)$$

K_{rel} —可靠系数，取1.2~1.3；

K_{np} —非周期分量系数。当差动回路采用速饱和变流器时取1；当差动回路采用串联电阻降低不平衡电流时取1.5~2；

K_{er} —电流互感器的10%误差系数；

K_{st} —同型系数，两侧TA型号相同时取0.5，不同时取1；

I_{k-max} —外部短路时流过TA的最大短路电流(二次值)。

在差动保护中采用ECT之后，不管对基波、谐波还是非周期性分量，测量精确度得到很大提高。在整定公式(2-1)中，采用传统CT的差动保护 K_{er} 通常按CT为10%误差来取值，为0.1。依据IEC60044-8的规定，0.1级的ECT在100%和120%额定电流下，它的误差保持在 $\pm 0.1\%$ 范围之内，故理论上 K_{er} 能取0.01。因此应用ECT的差动保护其动作电流整定值为原来的10%，灵敏度提高了10倍。

(2)拐点电流 I_{res-g} 。拐点电流的大小主要是依据差动保护所采用的TA的误差曲线特性进行整定。为了避免区外故障时保护的误动作，基于传统CT的差动保护的拐点电流取值不能过大，取值一般接近于互感器的额定制动电流值。因为ECT不存在饱和现象、额定电流范围大、测量精度高的特点，因此基于ECT的差动保护拐点电流的取值可以取的大一些，约为1.5-2倍的额定制动电流值。

(3)制动系数K。一方面，由于ECT在实际应用中依然有10%最大峰值瞬时误差，并且误差随着一次电流的增大而增大。为了防止ECT误差引起的误动作，采用ECT的电流差动保护仍需采用比率制动特性，取 $K \neq 0$ 。另一方面，由于ECT不存在饱和现象，在故障情况下仍能准确传变一次电流，测量精确度高。因此基于ECT的差动保护中制动系数K取值可以取小一些。

综上所述，采用ECT构成的差动保护，对原有比率制动特性的整定可以加以改进。具体来说，可以减小差动最小动作电流 $I_{set-min}$ 、增大拐点电流 I_{res-g} 、减小比率制动系数K，改进后的比率制动特性见图2-1。如果基于传统电磁式CT的差

动保护动作区为A，那么基于ECT的差动保护动作区为A+B。

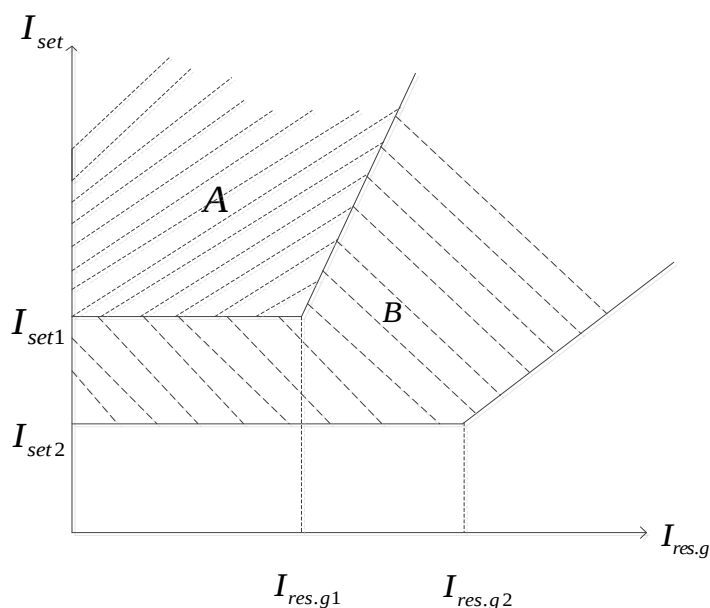


图2-1 基于两种不同互感器的差动保护特性

由上面分析可以知道，与基于传统的CT差动保护相比，应用ECT后的差动保护增大了保护动作区域。此外，由于应用ECT差动保护的判据不必考虑互感器饱和的情况，这不仅大大地简化了保护的逻辑，而且避免了因判据复杂可能引起的保护拒动或误动的情况。

基于ECT的差动保护比率制动特性，除了可以保证保护的可靠性之外，更重要的是能够提高保护的灵敏性，这是引入ECT后给差动保护性能带来的很大改善。

2.7 本章小结

分析了常规互感器和电子式互感器对保护原理的影响，并重点论述了互感器分别对线路距离保护的影响、对纵联方向(距离)保护的影响、对纵联差动保护的影响。并制作了比率特性曲线定性对比分析两种互感器对线路差动保护的影响。

第3章 永定河 220kV 变电站互感器选择及优化

3.1 常规方式互感器“减组降容”原因

常规方式下互感器二次绕组输出与二次设备直连，考虑到二次负荷的要求，一个二次绕组不宜带过多的二次设备，即使参数相同，也可能必须单独配置二次绕组。

线路、母线保护由于要求各互感器的特性及负荷完全一致，避免由于所接负荷容量不同造成线路、母线保护误动。

常规互感器输出为强电模拟信号(1A 或 5A, 100V 或 57.7V)，不能直接提供与数字系统相匹配的数字信号输出，须采用带模拟量插件的合并单元将常规互感器的模拟信号转为数字信号输出。具体详见下图 3-1 所示：

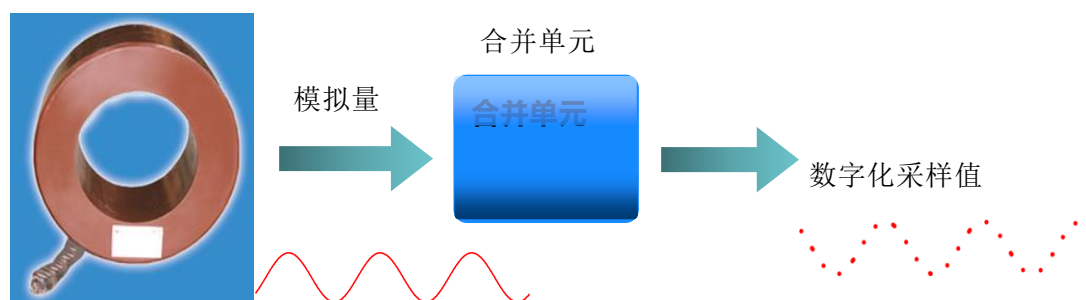


图 3-1 常规互感器数字化采样原理图

3.2 “常规互感器+合并单元”模式“减组降容”可行性分析

引入合并单元后，由于互感器的模拟量实现了就地数字化传输，不存在容量的问题，只要对二次绕组的准确级要求等技术参数相同，就可以共用二次绕组，从而有效地减少了二次绕组的数量。

“常规互感器+合并单元”模式采用“减组降容”方案，由于不存在互感器二次接入容量的问题，母线保护和线路保护可共用电流互感器二次绕组。在此仅以 220kV 母线一线路保护为例，保护配置如图 3-2 所示：

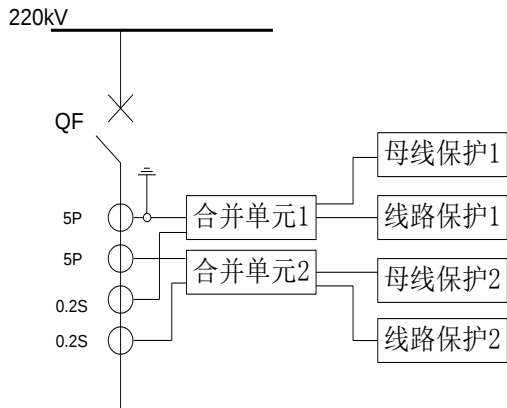


图 3-2 “常规互感器+合并单元”下 220kV 线路间隔电流互感二次绕组配置方案

按“减组”方案配置的电流互感器保护在线上各点发生故障时保护动作情况与按常规方式配置电流互感器的保护对比如下图 3-3、3-4：

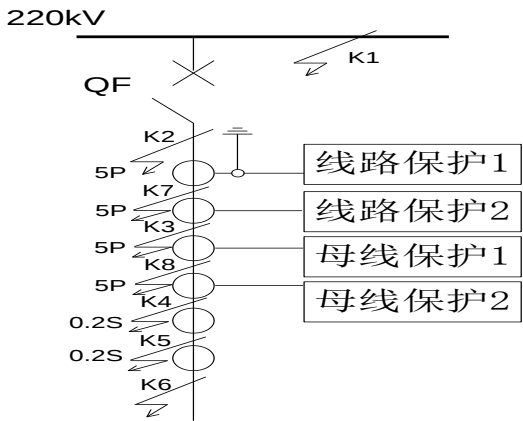


图 3-3 常规方式下 220kV 线路间隔故障情况

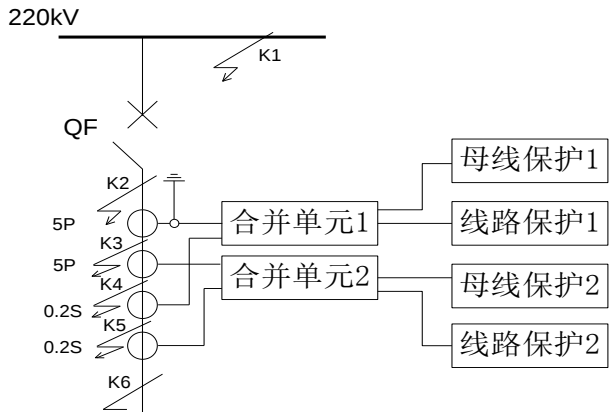


图 3-4 “常规互感器+合并单元”下 220kV 线路间隔故障情况

故障时两种配置方式下保护动作情况分析参见表 3-1 至表 3-11。

表 3-1 正常情况(保护均投入)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案 停电范围 对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路 保护 1	线路 保护 2	母线 保护 1	母线 保护 2	理应切除	实际切除	线路 保护 1	线路 保护 2	母线 保护 1	母线 保护 2	理应切除	实际切除	
K1			√	√	母线上 所有出线	母线上 所有出线			√	√	母线上所有 出线	母线上所有出 线	相同
K2			√	√	故障线路	母线上所有 出线扩大事 故范围			√	√	故障线路	母线上所有出 线扩大事故范 围	相同
K3	√	√	√	√	故障线路	故障线路	√		√		故障线路	故障线路	相同
K4	√	√			故障线路	故障线路	√	√			故障线路	故障线路	相同
K5	√	√			故障线路	故障线路	√	√			故障线路	故障线路	相同
K6	√	√			故障线路	故障线路	√	√			故障线路	故障线路	相同
K7	√		√	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的 故障类型扩大了 停电范围 第一套方式增加的 故障类型扩大了 停电范围
K8	√	√		√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	

表 3-2 线路保护 1 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案 停电范围 对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	
K1	——		√	√	母线上所有出线	母线上所有出线	——		√	√	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2	——		√	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	——		√	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	——	√	√	√	故障线路	故障线路	——		√		故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	第二套方式增大了故障范围
K4	——	√			故障线路	故障线路	——	√			故障线路	故障线路	相同
K5	——	√			故障线路	故障线路	——	√			故障线路	故障线路	相同
K6	——	√			故障线路	故障线路	——	√			故障线路	故障线路	相同
K7	——		√	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	——	√		√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围

表 3-3 线路保护 2 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案停电范围对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	
K1		——	√	√	母线上所有出线	母线上所有出线		——	√	√	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2		——	√	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围		——	√	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	√	——	√	√	故障线路	故障线路	√	——	√		故障线路	故障线路	相同
K4	√	——			故障线路	故障线路	√	——			故障线路	故障线路	相同
K5	√	——			故障线路	故障线路	√	——			故障线路	故障线路	相同
K6	√	——			故障线路	故障线路	√	——			故障线路	故障线路	相同
K7	√	——	√	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围 第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	√	——		√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	

表 3-4 母线保护 1 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案停电范围对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	
K1			——	√	母线上所有出线	母线上所有出线			——	√	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2			——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围			——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	√	√	——	√	故障线路	故障线路	√		——		故障线路	故障线路	相同
K4	√	√	——		故障线路	故障线路	√	√	——		故障线路	故障线路	相同
K5	√	√	——		故障线路	故障线路	√	√	——		故障线路	故障线路	相同
K6	√	√	——		故障线路	故障线路	√	√	——		故障线路	故障线路	相同
K7	√		——	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围 第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	√	√	——	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	

表 3-5 母线保护 2 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案 停电范围 对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护 1	线路保护 2	母线保护 1	母线保护 2	理应切除	实际切除	线路保护 1	线路保护 2	母线保护 1	母线保护 2	理应切除	实际切除	
K1			√	——	母线上所有出线	母线上所有出线			√	——	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2			√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围			√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	√	√	√	——	故障线路	故障线路	√		√	——	故障线路	故障线路	相同
K4	√	√		——	故障线路	故障线路	√	√		——	故障线路	故障线路	相同
K5	√	√		——	故障线路	故障线路	√	√		——	故障线路	故障线路	相同
K6	√	√		——	故障线路	故障线路	√	√		——	故障线路	故障线路	相同
K7	√		√	——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	√	√		——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围

表 3-6 线路保护 1 检修(故障)、2 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案停电范围对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	
K1	——	——	√	√	母线上所有出线	母线上所有出线	——	——	√	√	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2	——	——	√	√	故障线路	母线上所有出线 扩大事故范围	——	——	√	√	故障线路	母线上所有出线 扩大事故范围	相同
K3	——	——	√	√	故障线路	母线上所有出线 扩大事故范围	——	——	√		故障线路	母线上所有出线 扩大事故范围	相同
K4	——	——			故障线路	无法切除故障	——	——			故障线路	无法切除故障	相同
K5	——	——			故障线路	无法切除故障	——	——			故障线路	无法切除故障	相同
K6	——	——			故障线路	无法切除故障	——	——			故障线路	无法切除故障	相同
K7	——	——	√	√	故障线路	母线上所有出线 扩大事故范围	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型 扩大了停电范围
K8	——	——		√	故障线路	母线上所有出线 扩大事故范围	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型 扩大了停电范围

表 3-7 线路保护 1 检修(故障)、母线保护 1 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案停电范围对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	
K1	——		——	√	母线上所有出线	母线上所有出线	——		——	√	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2	——		——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	——		——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	——	√	——	√	故障线路	故障线路	——		——		故障线路	无法切除故障	第二套方式增大了故障范围
K4	——	√	——		故障线路	故障线路	——	√	——		故障线路	故障线路	相同
K5	——	√	——		故障线路	故障线路	——	√	——		故障线路	故障线路	相同
K6	——	√	——		故障线路	故障线路	——	√	——		故障线路	故障线路	相同
K7	——		——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	——	√	——	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围

表 3-8 线路保护 1 检修(故障)、母线保护 2 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案停电范围对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	线路保护1	线路保护2	母线保护1	母线保护2	理应切除	实际切除	
K1	——		√	——	母线上所有出线	母线上所有出线	——		√	——	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2	——		√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	——		√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	——	√	√	——	故障线路	故障线路	——		√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	第二套方式增大了故障范围
K4	——	√		——	故障线路	故障线路	——	√		——	故障线路	故障线路	相同
K5	——	√		——	故障线路	故障线路	——	√		——	故障线路	故障线路	相同
K6	——	√		——	故障线路	故障线路	——	√		——	故障线路	故障线路	相同
K7	——		√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	——	√		——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围

表 3-9 线路保护 2 检修(故障)、母线保护 1 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案停电范围对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路保护 1	线路保护 2	母线保护 1	母线保护 2	理应切除	实际切除	线路保护 1	线路保护 2	母线保护 1	母线保护 2	理应切除	实际切除	
K1		——	——	√	母线上所有出线	母线上所有出线		——	——	√	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2		——	——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围		——	——	√	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	√	——	——	√	故障线路	故障线路	√	——	——		故障线路	故障线路	相同
K4	√	——	——		故障线路	故障线路	√	——	——		故障线路	故障线路	相同
K5	√	——	——		故障线路	故障线路	√	——	——		故障线路	故障线路	相同
K6	√	——	——		故障线路	故障线路	√	——	——		故障线路	故障线路	相同
K7	√	——	——	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	√	——	——	√	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围

表 3-10 线路保护 2 检修(故障)、母线保护 2 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案 停电范围 对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路 保护 1	线路 保护 2	母线 保护 1	母线 保护 2	理应切除	实际切除	线路 保护 1	线路 保护 2	母线 保护 1	母线 保护 2	理应切除	实际切除	
K1		——	√	——	母线上所有出线	母线上所有出线		——	√	——	母线上所有出线	母线上所有出线	相同
K2		——	√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围		——	√	——	故障线路	母线上所有出线扩大事故范围	相同
K3	√	——	√	——	故障线路	故障线路	√	——	√	——	故障线路	故障线路	相同
K4	√	——		——	故障线路	故障线路	√	——		——	故障线路	故障线路	相同
K5	√	——		——	故障线路	故障线路	√	——		——	故障线路	故障线路	相同
K6	√	——		——	故障线路	故障线路	√	——		——	故障线路	故障线路	相同
K7	√	——	√	——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围
K8	√	——		——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式增加的故障类型扩大了停电范围

表 3-11 母线保护 1 故障(检修)、母线保护 2 故障(检修)下发生故障时两种电流互感器二次绕组配置方案保护动作对比

故障点	各保护动作情况												两种方案 停电范围 对比
	常规方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						常规互感器+合并单元方式 220kV 线路间隔电流互感器二次绕组配置						
	线路 保护 1	线路 保护 2	母线 保护 1	母线 保护 2	理应切除	实际切除	线路 保护 1	线路 保护 2	母线 保护 1	母线 保护 2	理应切除	实际切除	
K1			——	——	无法切除故障	无法切除故障			——	——	无法切除故障	无法切除故障	相同
K2			——	——	故障线路	无法切除故障			——	——	故障线路	无法切除故障	相同
K3	√	√	——	——	故障线路	故障线路	√		——	——	故障线路	故障线路	相同
K4	√	√	——	——	故障线路	故障线路	√	√	——	——	故障线路	故障线路	相同
K5	√	√	——	——	故障线路	故障线路	√	√	——	——	故障线路	故障线路	相同
K6	√	√	——	——	故障线路	故障线路	√	√	——	——	故障线路	故障线路	相同
K7	√		——	——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式 增加的故障类型 扩大了停电范围
K8	√	√	——	——	故障线路	故障线路	——	——	——	——	——	——	第一套方式 增加的故障类型 扩大了停电范围

根据以上两套方案对比可得如下结论：

(1)若各套保护在正常情况下（保护均投入），两套方案的保护动作的选择性都相同，而常规互感器+合并单元下较常规方式下减少了两种故障类型。

(2)若各套保护中的一套检修（故障），仅在线路保护 1 检修或故障，常规互感器+合并单元下 K3 点故障与常规方式下 K7 点故障，停电范围一样。在其它情况下，两套方案的保护动作的选择性都相同。

(3)若各套保护中的一套检修，一套故障（或者其中两套同时故障），在线路保护 1 检修（故障）、母线保护 1 故障（检修）下，K3 点故障常规互感器+合并单元将无法切除故障，扩大事故范围；在线路保护 1 检修（故障）、母线保护 2 故障（检修），常规互感器+合并单元下 K3 点故障与常规方式下 K7 点故障，停电范围一样。在其它情况下，两套方案的保护动作的选择性都相同。

常规互感器+合并单元方式下在线路和母线上各点发生故障均有两套保护，较常规方式减少了故障类型，降低了一部分的故障风险。双套保护互相冗余，一般情况下足以满足继电保护的要求，仅当双套保护均故障或双套保护中一套检修，一套故障的情况下，在双套保护区的范围内存在死区问题，目前按常规配置电流互感器的保护同样存在该问题，实际双套保护同时故障的概率极低，而检修中任一保护检修均整间隔设备全停，为极端条件下增加大量的投资无意义。

综上所述，常规互感器+合并单元下“减组”的方案是可行的。

3.3 永定河变互感器二次绕组“减组”方案

3.3.1 220kV 二次绕组配置

永定河变本期 220kV 为双母线接线，远期为双母单分段接线，电流互感器均按间隔配置、仅母线配置电压互感器、线路不配置电压互感器。常规方式下互感器配置参见表 3-12、3-13。

表 3-12 常规方式下 220kV 间隔电流互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
线路间隔	1	5P	线路保护 1
	2	5P	线路保护 2/故障录波
	3	5P	母线保护 1
	4	5P	母线保护 2
	5	0.5	测量
	6	0.2S	计量

表 3-12(续表)

母联间隔	1	5P	母联保护
	2	5P	母线保护 1
	3	5P	母线保护 2
	4	5P	故障录波
	5	5P	备用
	6	0.5	测量
母分间隔	1	5P	母分保护
	2	5P	母线保护 1
	3	5P	母线保护 2
	4	5P	故障录波
	5	5P	备用
	6	0.5	测量
主变进线	1	5P	主变保护 1
	2	5P	主变保护 2/故障录波
	3	5P	母线保护 1
	4	5P	母线保护 2
	5	0.5	测量
	6	0.2S	计量
主变 220kV 侧 公共绕组	1	5P	中性点零序过流保护 1
	2	5P	中性点零序过流保护 2
主变 110kV 侧 公共绕组	1	5P	中性点零序过流保护 1
	2	5P	中性点零序过流保护 2

表 3-13 常规方式下 220kV 母线电压互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
母线 (三相)	1	0.2	线路/主变计量
	2	0.5 (3P)	线路保护 1/主变保护 1/线路、主变测量
	3	0.5 (3P)	线路保护 2/主变保护 2/同期
	4	6P	录波

常规方式下 220kV 线路（母联、母分）间隔需配置 6 个电流互感器二次绕组，主变进线间隔需配置 6 个电流互感器二次绕组，主变公共绕组需配置 2 个二次绕组；母线 PT 需配置 3~4 个三相二次绕组。

常规互感器+合并单元方式下的互感器配置及统计参见表 3-14、3-15。

表 3-14“常规互感器+合并单元”模式 220kV 间隔电流互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
线路（母联、母分） 间隔	1	5P	线路保护 1（母联保护 1、母分保护 1）/母线保护 1
	2	5P	线路保护 2（母联保护 2、母分保护 2）/母线保护 2
	3	0.2S	测量
	4	0.2S	计量
主变进线	1	5P	主变保护 1/母线保护 1
	2	5P	主变保护 2/母线保护 2
	3	0.2S	测量
	4	0.2S	计量

表 3-15 “常规互感器+合并单元”模式 220kV 间隔电压互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
母线 (三相)	1	0.2	母线计量
	2	0.5（3P）	线路保护 1/主变保护 1/线路、主变测量
	3	0.5（3P）	线路保护 2/主变保护 2/同期

由以上分析可知，常规互感器+合并单元方式下 220kV 线路（母联、母分）间隔需配置 4 个电流互感器二次绕组，较常规方式减少 33%，主变进线间隔需配置 4 个二次绕组，较常规方式下减少 33%，主变 220kV 侧公共绕组电流互感器均需配置 2 组二次绕组，同常规方式；母线 PT 均需配置 3 个三相电压互感器二次绕组，同常规方式。

3.3.2 110kV 二次绕组配置

永定河变 110kV 为单母线分段接线，电流互感器按间隔配置、仅母线配置电压互感器，线路不配置电压互感器。常规方式下互感器配置参见表 3-16、3-17。

表 3-16 常规方式下 110kV 间隔电流互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
线路间隔	1	5P	线路保护
	2	5P	母线保护
	3	5P	故障录波
	4	0.5	测量
	5	0.2S	计量

表 3-16(续表)

母分间隔	1	5P	母分保护
	2	5P	母线保护
	3	5P	故障录波
	4	5P	备用
	5	0.5	测量
主变进线	1	5P	主变保护 1
	2	5P	主变保护 2
	3	5P	母线保护
	4	5P	故障录波
	5	0.5	测量
	6	0.2S	计量

表 3-17 常规方式下 110kV 间隔电压互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
母线 (三相)	1	0.2	母线计量
	2	0.5 (3P)	母线测量/同期
	3	0.5 (3P)	同期
	4	6P	录波

常规方式下 110kV 线路（母分）间隔需配置 5 个电流互感器二次绕组，主变进线间隔需配置 6 个电流互感器二次绕组，主变公共绕组需配置 2 个二次绕组；母线 PT 需配置 3~4 个三相二次绕组。

常规互感器+合并单元方式下的互感器配置及统计参见表 3-18、3-19。

表 3-18 “常规互感器+合并单元”模式 110kV 间隔电流互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
线路（母分）间隔	1	5P	线路保护（母分保护）/母线保护
	2	0.2S	测量/计量
主变进线	1	5P	主变保护 1/母线保护
	2	5P	主变保护 2
	3	0.2S	测量
	4	0.2S	计量

表 3-19“常规互感器+合并单元”模式 110kV 间隔电压互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
母线 (三相)	1	0.2	母线计量
	2	0.5 (3P)	母线测量/同期
	3	0.5 (3P)	同期

由以上分析可知，常规互感器+合并单元方式下 110kV 线路（母分）间隔需配置 2 个电流互感器二次绕组，较常规方式减少 60%，主变进线间隔需配置 4 个二次绕组，较常规方式下减少 33%，主变 110kV 侧公共绕组电流互感器均需配置 2 组二次绕组，同常规方式；母线 PT 均需配置 3 个三相电压互感器二次绕组，同常规方式。

3.3.3 35kV 二次绕组配置

永定河变 35kV 部分通常为单母线分段接线，仅主变进线配置合并单元，其余馈线、电容器、站变等间隔电流互感器同常规站，35kV 母线电压互感器同常规站。常规方式下主变进线电流互感器配置及数量统计参见表 3-20。

表 3-20 常规方式下主变 35kV 进线间隔电流互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
主变进线	1	5P	主变保护 1
	2	5P	主变保护 2
	3	5P	故障录波
	4	0.5	测量
	5	0.2S	计量

常规方式下主变压器进线需配置 5 个电流互感器二次绕组。

常规互感器+合并单元方式下的互感器配置及统计参见表 3-21。

表 3-21 主变 35kV 进线间隔电流互感器二次绕组配置表

单元	序号	准确级	功能
主变进线断路器或套管	1	5P	主变保护 1/故障录波
	2	5P	主变保护 2
	3	0.2S	测量
	4	0.2S	计量

分析可知，常规互感器+合并单元下 35kV 主变进线间隔需配置 4 个二次绕组，较常规方式下减少 25%；

常规方式下与常规互感器+合并单元方式下永定河 220kV 变电站电流电压互感器配置情况见表 3-22、3-23。

表 3-22 电流互感器二次绕组数量优化结果

220kV/间隔		110kV/间隔		35kV/间隔	
常规方式	常规互感器+合并单元	常规方式	常规互感器+合并单元	常规方式	常规互感器+合并单元
二次绕组数量	线路（母联、母分）间隔：6 主变进线间隔：6 主变公共绕组：2	线路（母联、母分）间隔：4 主变进线间隔：4 主变公共绕组：2	线路（母分）间隔：5 主变进线间隔：6 主变公共绕组：2	线路（母分）间隔：2 主变进线间隔：4 主变公共绕组：2	主变进线断路器：5 主变进线断路器：4
绝对差值	线路（母联、母分）间隔：2 主变进线间隔：2 主变公共绕组：0	线路（母分）间隔：3 主变进线间隔：2 主变公共绕组：0	主变进线断路器：1		
相对差值	线路（母联、母分）间隔：33% 主变进线间隔：33% 主变公共绕组：0%	线路（母联、母分）间隔：60% 主变进线间隔：33% 主变公共绕组：0%	主变进线断路器：20%		

表 3-23 电压互感器二次绕组数量优化结果

	220kV		110kV	
	常规方式	常规互感器+合并单元	常规方式	常规互感器+合并单元
二次绕组数量	母线：3~4	母线：3	母线：3~4	母线：3
绝对差值	母线：0~1		母线：0~1	
相对差值	母线：0~25%		母线：0~25%	

3.3.4 常规互感器数字化采样方式“降容”技术

3.3.4.1 常规互感器容量计算方法

(1) 电流互感器二次绕组容量

设电流互感器二次负荷为 Z_b ，电流互感器二次侧电流为 I_{sn} ，则电流互感器的二次容量为：

$$S_b = I_{sn}^2 \times Z_b$$

电流互感器的负荷通常由两部分组成：一部分是所连接的测量仪表或保护装置，另一部分是连接导线： $Z_b = \sum K_{rc} Z_r + K_{lc} R_l + R_c$
式中：

Z_r —继电器电流线圈阻抗，对于数字继电器可忽略电抗，仅计及电阻 R_r ；

R_l —连接导线电阻；

R_c —接触电阻，一般为 $0.05\Omega \sim 0.1\Omega$ ；

K_{rc} —继电器阻抗换算系数，参见表 3-24；

K_{lc} —连接导线阻抗换算系数，参见表 3-24；

表 3-24 继电器及连接导线阻抗换算系统表

电流互感器 接线方式	阻 抗 换 算 系 数							
	三相 短路		两相 短路		单相 短路接地		经 Y,d 变压器 两相短路	
	Klc	Krc	Klc	Krc	Klc	Krc	Klc	Krc
单相	2	1	2	1	2	1		
三相星形	1	1	1	1	2	1	1	1
两相	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	2	2	2	2	3	3
星形 $Z_{r0}=Z_r$								
星形 $Z_{r0}=0$	$\sqrt{3}$	1	2	1	2	1	3	1
两相差接	$2\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	4	2				
三角形	3	3	3	3	2	2	3	3

(2) 电压互感器二次绕组容量

电压互感器当二次负荷较重时需根据接线方式分相计算负荷，当二次负荷不大时只需根据下式按总负荷粗略计算：

$$S_b = U_{sn}^2 \times Y_b$$

式中， S_b 为电压互感器二次绕组容量， U_{sn} 为二次侧额定电压， Y_b 为二次导纳。

对于电压互感器，由于其负荷是高阻，因此二次连接介质对互感器误差影响不大，粗略计算时仅计算二次设备负荷即可。

3.3.5 永定河变互感器二次绕组“降容”方案

3.3.5.1 电流互感器“降容”方案

(1)常规方式下电流互感器二次绕组容量

首先计算连接介质的负荷：电流互感器二次额定电流取 1A，一般为三相星形接线， K_{lc} 取单相短路接地时的最大值 2，电缆采用截面积为 4mm^2 的控制电缆，长度取 200m，已知铜的电阻率为 $0.0175\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ，则连接介质负荷计算值为 1.75VA。

再计算二次设备负荷，每个保护二次设备的负荷约为 1VA，每个二次绕组按 2 个二次设备考虑，则二次设备负荷约为 2VA。

接触电阻的负荷约为 0.0025~0.01VA。最后可得常规方式下电流互感器二次绕组容量约为 3.75VA。

(2)常规互感器+合并单元方式下电流互感器二次绕组容量

合并单元就地放置，因而能显著减少电缆长度，按 20m 计算，其余条件同常规方式，则连接介质负荷计算值为 0.175VA。

另一方面，此时二次设备一般情况下可以只按一个合并单元计算，约为 1VA。最终可得电流互感器二次绕组容量约为 1.18VA。

可见，常规互感器+合并单元方式下电流互感器二次绕组容量较常规方式绝对值减少约 2.57 VA，相对值减少了 69%。

3.3.5.2 电压互感器“降容”方案

(1)常规方式下电压互感器二次绕组容量

常规方式下二次设备与电压互感器直连，每个二次绕组按 2 个二次设备考虑，因此常规方式下电压互感器二次负荷约为 2VA。

(2)常规互感器+合并单元方式下电压互感器二次绕组容量

引入合并单元后，电压互感器的二次负荷即为合并单元，一个二次绕组与一个合并单元相连，因此，二次负荷约为 1VA，与常规方式相比，绝对值减少 1VA，相对值减少 50%。

通过以上计算结果可知：

(1)电缆长度减少是二次绕组容量得以减少的主要原因，电缆长度减少得越多，二次绕组容量减少相应的也越多。

(2)二次绕组容量减少后，相应的体积随之减少，绝缘特性得以改善，减小了制造安装难度，便于与其它设备整合，从而减小变电站占地面积；与此同时，减少了电缆长度及电缆安装敷设的工作量，在维持原有性能的同时使变电站的造价得以降低。

3.4 永定河变互感器配置方案

永定河220kV变电站电流互感器配置清单参见表3-25。

表3-25 永定河220kV变电站电流互感器配置一览表

电压等级 项目	220kV	110kV	35kV
主接线	双母线单分段	单母线分段	单母线分段
台数	3 台/间隔	3 台/间隔	3 台/间隔
安装方式	GIS 内安装	GIS 内安装	开关柜内安装
二次额定电 流	1A	1A	1A
准确级	主变进线、出线、 分段、母联： 5P/5P/0.2S/0.2S	主变压器进线： 5P/5P/0.2S/0.2S 出线、分段、母联： 5P/0.2S	馈线、电容器及站用变： 0.2/0.5/3P 主变 35kV 侧进线： 5P/5P/0.2S/0.2S
二次绕组数 量	主变、出线、母联、 分段：4	主变压器：4 出线、母联、分段：2	馈线、电容器及站用变：3 主变压器 35kV 侧进线：4
二次绕组量	5VA	5VA	5VA

永定河220kV变电站电压互感器配置清单参见表3-26。

表3-26 永定河220kV变电站电压互感器配置一览表

电压等级	220kV	110kV	35(66)kV
主接线	双母线单分段	单母线分段	单母线分段
台数	母线：三相；	母线：三相；	母线：三相；
安装方式	GIS 内安装	GIS 内安装	独立安装
准确级	母线： 0.2/0.5(3P)/0.5(3P)	母线：0.2/0.5(3P)/0.5(3P)	母线： 0.2/0.5/ 3P
二次绕组数量	母线：4	母线：4	母线：3
额定变比 (母线)	$\frac{220}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}}$	$\frac{220}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}}$	$\frac{35}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ kV}$
二次绕组容量	5VA	5VA	5VA

3.5 本章小结

根据以上结果可知：

(1)通过引入合并单元后共用二次绕组，电流互感器二次绕组得以显著减少。
永定河 220kV 变电站设 3 台主变，12 条 220kV 出线，15 条 110kV 出线，可减

少约 84 个二次绕组。

(2)电压互感器二次绕组的数量变化不大。

(3)二次绕组数量减少后，在不影响一次设备安全可靠性的情况下，或有效降低互感器的高度，减小体积，改善绝缘特性，减小制造安装难度，便于与其它设备整合，从而减小变电站占地面积，经济效益显著。

(4)通过配置“常规互感器+合并单元”模式，实现采样数据的全站共享，节省了电缆连接，就采样值回路而言，以2km光缆取代近40km长电缆，节省费用近90万元；简化设备接口，二次装置与就地合并单元均通过光缆连接，光口插接取代端子排接线；优化电流互感器参数配置，减少二次绕组数量及容量要求，220kV每间隔减少2组二次绕组，110kV每间隔减少3组二次绕组，每个二次绕组容量减少5VA。

第 4 章 承德市区南 220kV 变电站互感器选型方案

4.1 电子式互感器选型与配置方案

4.1.1 110kV 及 220kV 电流互感器选型

承德市区南 220kV 变电站 110kV 和 220kV 采用 GIS 设备，电学原理的 ECT 无明显缺点，且运行经验较丰富，是值得推荐的方案，当 ECT 和 GIS 罐体统一设计时，该方案可靠性更高；

全光纤原理的电流互感器基本解决了光学互感器固有的温度稳定性差等缺点，有突出的优点，目前代表了 ECT 的发展趋势，已有成功运行的案例，值得在智能变电站中采用。

综上所述，两种原理的 ECT 均可以在本站采用，从技术发展趋势和先进性方面考虑，推荐 110kV 和 220kV 采用全光纤原理的 ECT。

4.1.2 35kV 及主变中性点电流互感器选型

本站 35kV 保护测控（除主变）安装在开关柜上，互感器选型如下：

(1) 35kV 主进电流互感器

220kV 和 110kV 主进均采用全光纤电流互感器，若按照主变三侧特性一致的原则配置，35kV 主进也应采用全光纤电流互感器。

全光纤电流互感器价格昂贵，厂家一般不开发 110kV 以下电压等级产品。本站 35kV 主进若采用全光纤电流互感器，设备选型只能参考 110kV 等级产品。根据调研，110kV 光纤电流互感器国内厂家报价为 9.5 万/相（单套传感头）；而基于罗式线圈原理的 35kV 电子式电流互感器价格仅为 3000 元/相（单套线圈），常规 35kV 电流互感器价格仅为 2000 元/相。

从经济性上，35kV 主进采用全光纤电流互感器显然不合适，宜采用电学原理的电子式互感器或常规互感器。

由于主变保护单独组柜，与 35kV 电流互感器不在同一处安装，采用常规互感器时必须将合并单元安装在开关柜上采用实现数字传输，工程应用时技术合理性较差；宜采用数字输出的电学式电子式互感器，此时合并单元可安装在保护柜上，提高了运行的可靠性。

35kV 主进若采用电学式电子式互感器（罗氏线圈或低功率线圈原理），必须考虑主变差动保护对三侧互感器特性不一致的适应性。分析如下：

在常规变电站中, 变压器各侧电磁式 CT 的瞬态特性不一致, 提高了变压器差动保护的瞬态不平衡电流。现在的常规解决方法是安装特性一样的 CT, 或提高保护动作电流整定值, 这势必会影响保护动作灵敏度。若采用全光纤式或 Rogowski 线圈式电子电流互感器后, 每个互感器的瞬态误差仅为百分之 0.2, 这使得各 CT 的二次暂态电流基本一样, 提高了匝间短路灵敏度 10 多倍, 明显提高了变压器差动保护的有效性。

另外, 若因三侧互感器误差限值不相同产生差流, 还可通过合适的差动定值的整定来躲过因为互感器类型不一致而产生的差流, 使保护不至于误动。

在现有数字化变电站中, 也有主变三侧采用不同类型电子式 CT, 或混合使用电子式 CT 及常规电磁式 CT 的实例, 均可通过适当的同步及定值整定方案满足主变差动保护要求。

因此, 承德市区南变电站主变高中压侧采用光纤电流互感器, 低压侧采用罗氏线圈从技术上是可行的。

(2) 35kV 其余间隔电流互感器

除 35kV 主进外, 其余 35kV 间隔电流互感器可选择模拟小信号输出电子式互感器或常规互感器。分析如下:

从互感器本身的成本分析, 35kV 常规电流互感器价格约为 2000 元/相, 35kV 电子式电流互感器价格约为 3000 元/相, 两种互感器价格均较为低廉。

从配套的二次设备上分析, 保护测控设备采用模拟输入时, 与两种互感器配合接口有所不同, 但原理相同; 保护测控设备采用数字输入时, 与两种互感器配合都需要配置合并器, 成本也基本相同。

从技术意义上分析, 电子式互感器具有无饱和现象、精度高、动态范围大等优点, 较常规互感器具有突出优势。

采用常规互感器时不可避免的面临饱和问题, 在参数及变比选择上需认真考虑; 而电子式互感器参数相对容易选择。

对于 35kV 所变间隔, 额定电流小, 短路电流大, 采用常规互感器时变比较难选择, 一般采用大变比小抽头方式解决, 增加了互感器的制造难度。电子式互感器动态范围大, 较容易选择额定参数, 即满足稳态精度, 又保证短路电流倍数。

从智能变电站建设理念上分析, 35kV 采用电子式互感器统一了全站的互感器类型和原理, 也有利于运行和维护, 更能充分体现智能变电站的统一性与先进性。

(3) 主变中性点电流互感器

主变中性点 CT 安装在户外, 宜采用穿心式基于罗氏线圈原理的 ECT, 性价比高, 且有较多的运行经验。

(4)35kV 主进间隔推荐采用数字输出的电学原理电子式互感器，其余间隔推荐采用模拟小信号输出电学原理电子式互感器。主变中性点 CT 采用穿心式基于罗氏线圈原理的电子式互感器。

4.1.3 电子式互感器配置方案

(1)方案一

220kV 及 110kV 各间隔间隔配置三相光纤式电流互感器，即 FOCT。

35kV 各间隔及主变中性点配置三相电学原理的电流互感器 ECT。

220kV、110kV 及 35kV 母线配置三相电子式电压互感器 EVT；

220kV 及 110kV 出线、220kV 及 110kV 主进间隔配置三相电子式电压互感器 EVT。

在 220kV 两回出线(分别至袁庄、营子)试点挂网运行 OVT，考虑到该设备可靠性及稳定性问题，采用户外柱式布置，最大限度减少对变电站可靠运行的影响。

(2)方案二

220kV 及 110kV 出线、220kV 及 110kV 主进间隔配置三相电子式电流电压组合式互感器 ECVT；

220kV、110kV 及 35kV 母线配置三相电子式电压互感器 EVT；

35kV 各间隔配置三相电子式电流互感器 ECT。

主变中性点配置三相电子式电流互感器 ECT。

(3)方案选择

本站采用方案一

4.1.4 电子式互感器线圈（传感元件）配置原则

(1)电学原理的互感器

a)电流互感器

220kV 主变三侧间隔电流互感器均按照保护双重化原则布置互感器线圈，线圈布置原则为 2 个保护线圈（Rogowski）+1 个计量线圈（LPCT），准确级次：5TPE/5TPE/0.2S。

对应于 2 个保护线圈，配置两路独立的数据采样系统，与两套合并器一一对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器；对于计量线圈，由两路数据采样系统同时采样，即将计量线圈接入 4 路 A/D 系统中，计量采样数据送至两组合并器中。

110kV 各间隔电流互感器均按照保护单套原则布置互感器线圈，线圈布置原则为 1 个保护线圈 (Rogowski) +1 个计量线圈 (LPCT)，准确级次：5TPE/0.2S。

110kV 对应于 1 个保护线圈，配置 1 路数据采样系统，与单套合并器相对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器；对于计量线圈，需接入 2 路 A/D 系统。

35kV 各间隔（除主变外）均按照保护单套原则布置互感器线圈，线圈布置原则为 1 个保护线圈 (Rogowski) +1 个计量线圈 (LPCT)，准确级次：5TPE/0.2S。

35kV 对应于 1 个保护线圈，配置 1 路数据采样系统，与单套合并器相对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器；对于计量线圈，需接入 2 路 A/D 系统。

主变中性点按照保护双重化原则布置互感器线圈，线圈布置原则为 2 个保护线圈（罗氏线圈），准确级次：5TPE/5TPE。

主变中性点对应于 2 个保护线圈，配置两路独立的数据采样系统，与两套合并器一一对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器。

b)电压互感器

各电压等级母线每相配置 1 个传感元件，准确级次：0.2（3P）。配置两路独立的数据采样系统，与两套合并器一一对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器。

220kV 线路、220kV 及 110kV 主进每相配置 1 个传感元件，准确级次：0.2（3P）。准确级次：0.2（3P）/3P。配置两路独立的数据采样系统，与两套合并器一一对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器。

110kV 线路每相配置 1 个传感元件，准确级次：0.2（3P）。配置 1 路独立的数据采样系统，与单套合并器对应，每路采样系统均采用双 A/D 系统接入合并器。

(2)光学原理的互感器

a)全光纤原理电流互感器

220kV、主变高中压侧间隔电流互感器均按照保护双重化原则布置互感器传感头（光纤环），每套保护配置两个传感头，共 4 个传感头。同时满足保护、测量、计量的要求，准确级次：5TPE（0.2S）/5TPE（0.2S）/5TPE/5TPE；设置 4 路独立的数据采集系统（单 A/D 系统），对应于 2 台合并器。每两路数据采集系统通过各自通道输出至同一合并器。

110kV 各间隔电流互感器均按照保护单套原则布置互感器传感头（光纤环），每套保护配置两个传感头，共 2 个传感头。同时满足保护、测量、计量的要求，准确级次：5TPE（0.2S）；设置 2 路独立的数据采集系统（单 A/D 系统），对

应于 1 台合并器，2 路数据采集系统通过各自通道输出至同一合并器。

b)电压互感器

承德市区南 220kV 变电站考虑在两回 220kV 线路上挂网试点光学原理的 OVT，每相配置 1 个传感元件，准确级次：0.2（3P）。配置一路独立的数据采样系统（采用双 A/D），并单独配置 1 台电压合并器（与本间隔配置的 2 台合并器独立）。

4.2 合并单元的配置

4.2.1 合并单元与电子式互感器的接口

由图 4-1 可以看出，合并单元与电子式互感器接口时，信号采集是由电子式互感器完成的。合并单元的主要功能是将电子式互感器传输来的数据解码并组帧发给测控、保护等装置。而其与常规互感器接口时，信号采集是由合并单元完成的，经过小 TV、小 TA 变换后的模拟量由合并单元采集后，直接将数据组帧发给测控、保护等装置。

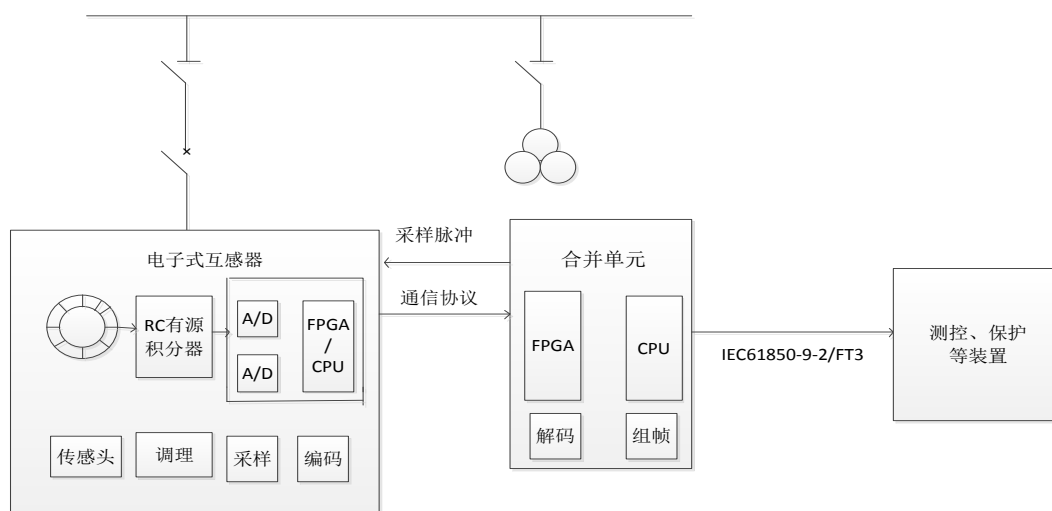


图 4-1 合并单元与电子式互感器接口

IEC 标准没有明确给出关于电子互感器与合并单元的接口问题，但明确给出了合并单元的数据输出格式。因此，如果由变电站自动化系统制造商研制并提供合并单元，厂家制造提供互感器，由于互感器厂家的采集器通常采用私有规约，那么就存在电子式互感器与合并单元的接口问题；如果由电子式互感器制造商研制并提供合并单元，接口问题由电子式互感器制造商自己解决，就不存在统一接口标准的问题了。当前的数字化站中，合并单元主要还是由互感器制造厂家提供。因此在承德市区南 220kV 变电站中，从减少工程接口调试工作量的角度考虑，仍推荐由互感器厂家提供合并单元。

4.2.2 合并单元安装位置

合并单元作为电子式互感器的对外接口，其与互感器采集单元和间隔级保护测控录波等二次设备均为光纤联系，理论上安装位置比较灵活。

就目前实际运行情况看，大多数工程中合并单元是安放在主控室和保护一起组屏，主要原因有二：合并单元与间隔级设备的光纤联系更多，靠近有利于节省成本；另外，合并单元尽管为过程层设备，但是结构上也类似于一个“二次”设备，又由于一些厂家的电学式互感器采集单元与合并单元为一体化装置，互感器高压侧供电需要的激光器一般在合并单元中，其工作环境要求为恒温，主控室优良的温度及电磁兼容环境对合并单元更为有利。

4.2.3 合并单元的同步方案

经智能化一次设备、数字化保护装置与电子式互感器传输过来的数据输送到合并单元，其中主要包括同步采集的多路电流电压瞬时数据，合并单元会将这些电流电压信号转化成数字信号，最后将这些信号组帧发送给保护、控制等二次设备。

合并单元从电子式互感器接收了多达 12 路电流电压信号，所以各个信号的同步采样问题要重点考虑，主要包括以下 4 个方面：

(1)同一间隔内电流电压信号的同步测量。

(2)关联多间隔之间的电流电压信号的同步测量。比如集中式母线保护、主设备纵联差动保护等设备都需要相关间隔的电流电压同步测量数据。

(3)关联变电站之间的电流电压信号的同步测量，主要用于输电线路保护。

(4)广域同步。广域测量系统(WAMS)在全系统范围内需要实时对相角进行同步测量，随着变电站装设电子式互感器越来越广泛，全系统实时对相角同步测量很快就能实现。

4.2.3.1 采样数据同步方案

目前，采样数据同步的方法主要有 3 种。

方案 1：采用插值法

各测量环节 A/D 进行非同步采样，并用插值法在合并单元中算出同一时刻各环节电压电流的采样值，它不通过 GPS 而完成采样数据的同步。

方案 2：依靠全球定位系统(GPS)定时信号(秒脉冲、IRIG-B 码)

全站及相邻站共用一个 GPS 定时信号，智能采集模块的采样间隔通过 GPS 定时信号来调整，所采集到的信号输入合并单元计算处理后输出，自动实现各模拟量的同步采样。精度越高、完整性越好的定时信号同步效果越好，GPS 定时信

号的不完整可能会影响同步的精度。

方案 3：基于网络方式的 IEC61588 时间同步

IEC61588 的基本作用是使分布式网络内每个装置的时钟保持一致，它定义了一种精确时间协议 PTP(Precision Time Protocol)，标准以太网或其他采用多播技术的分布式总线系统中的传感器、执行器以及其他终端设备中的时钟都是通过时间协议 PTP 进行亚微秒级同步的。

当采样值传输采用 IEC61850-9-2 组网模式时，可很方便的引入了 IEC61588 精密对时协议，实现对时网和数据网合二为一。同时利用 IEC61588 的高精度特性，实现了采样同步的目的。因为 IEC61588 对时与 IEC 61850-9-2 数据共网，只要二次设备收到合并单元的数据，那么就是同步的，即使没有和绝对时间同步，也是几侧合并单元相对同步，可以满足差动要求。这一点也是有前提的：各侧合并单元对 IEC61588 的处理机制是一样的，尤其是在 GPS 恢复过程中。

4.2.3.2 采样数据同步方案选择

方案 1 利用 FT3 协议点对点方式传输 SV，由于 FT3 自身传输稳定、协议栈简单，可以在接收端实现多个 FT3 报文的软件插值同步。通过大规模现场可编程阵列(FPGA)来完成对多个 FT3 通道的插值同步，提高了可靠性；方案 1 的缺点是 SV 必须点对点传输，由于 FT3 协议私有性强，所以不同厂家的设备采用 FT3 协议难以互联。

方案 2 的同步方式简单，但严重依赖外部信号源，同步脉冲丢失可能造成保护不正确动作；

方案 3 的 IEC61588 对时能达到微妙级的对时和同步精度，可满足变电站内所有二次设备的对时和同步需求，且能否利用现有网络传输，不需要额外的对时和同步电缆，是一种理想的对时方式；缺点是相关交换机和装置均需要增加专用电路，增加了设备投资。

根据上面论证分析可知，承德市区南 220kV 变电站电子式互感器至合并单元的三相电流电压同步采用插值法，跨间隔差动保护采样值之间的同步采用插值法，强调高可靠性和独立性，满足智能变电站技术导则中保护直接采样的要求；非保护类的采样值之间的同步采用 IEC61588 技术，充分利用网络资源，既节省了同步电缆，又保证了同步的可靠性。

4.2.3.3 采样值输出格式

合并单元的采样值输出目前常用的有两种技术方案：一种是 IEC60044-8，采用点对点链接，它以 IEC60870-5-1 规定的 FT3 数据帧格式进行采样值报文传输；另外一种是采用 IEC61850-9 描述的以太网接入方式，遵循协议 ISO/IEC8802. 3 规定的帧格式进行数据封装，并凭借协议 TCP/P 实现数据传输。

而 IEC61850 标准对合并单元的采样值传输服务功能又分为两种，即 IEC 61850-9-1 和 IEC61850-9-2。前者以标准 IEC60044-7/8 为基础，而后者除基本服务外，增加了很多其他内容，但是对通信网络要求比较高。另外，今年 IEC61850-9-1 已经由 IEC 正式撤消，IEC60044-7/8 的 FT3 帧格式取消，也将被 IEC61869 所取代。因此本工程推荐采用 IEC 61850-9-2。

但应注意，采用 IEC 61850-9-2 格式后，合并单元与保护测控装置之间的数据匹配过程复杂，网络带宽需求较大。虽然许继、南瑞继保、深圳南瑞、西门子、ABB 等厂家的合并单元数据输出均能够提供 IEC 61850-9-2 格式，但就目前国内站点调研结果，IEC 61850-9-2 格式仅有部分间隔试点，并没有站内大规模实现的工程。

4.2.4 合并单元对不同采样精度装置的适应性分析

承德市区南 220kV 变电站保护测控装置要求的 SV 采样率为 80 点/周波，计量要求的 SV 采样率为 192 点/周波，有必要对两种不同采样率数据的传输和应用方案进行分析。

4.2.4.1 解决方案

该问题目前有四种解决方案，分别如下：

方案一：对采样率要求不是很高的装置，全站合并单元采用统一的采样率(80 点/周波)，并使用合并单元输出的采样值数据；对采样率要求比较高的设备，装配独立的电子式互感器，电子式互感器输出信号直接传输到装置处，经 A-D 转换后生成模拟小信号供装置使用，不经过合并单元。

方案二：全站合并单元采用统一的采样率（192 点/周波），并采用合并单元输出的采样值数据。

方案三：所有设备都使用合并单元输出的采样值数据，合并单元输出采样率根据不同需求进行设定，采样率要求低的场合设定 80 点/周波输出，采样率要求高的场合设定 192 点/周波输出。不同采样率数据从不同端口分别输出。

方案四：电子式互感器采用 10K 高采样率输出，所有设备都使用合并单元输出的采样值数据，合并单元输出采样率根据不同需求进行设定，采样率要求低的场合设定 48 点/周波输出，采样率要求高的场合设定 192 点/周波输出。不同采样率数据从同一端口输出，利用 GMRP(组播注册协议)技术实现不同采样率数据的自动寻址，供不同需求的装置使用。

4.2.4.2 方案选择

方案一独自为采样率要求高的设备装配电子式互感器，经济性很差；同时互感器采集的电流电压信号需要经 A-D-A 转换才能供设备使用，过程复杂，可靠

性差。

方案二合并单元采样率按最高要求输出，又以标准 IEC 61850-9-2 作为传输协议的条件下，采样值数据所占的带宽很大，越过了设备百兆信息处理能力百分之三十三的安全阈值，当前设备的千兆信息处理能力不足，可行性差。

方案三合并单元不同采样率数据从不同端口分别输出，满足需求的同时，所需端口数较多，经济性比较差。

方案四合并单元相同端口可输出不同采样率的数据，输出数据采用 GMRP 技术自动寻找与之目的 MAC 地址匹配的装置端口，在不增加硬件资源的前提下，能满足不同装置的实际使用需求，同时能有效控制采样值数据所占的带宽，可适应目前装置的百兆信息处理能力。

综上所述，方案一和方案二可实施性较差，不推荐在本站采用；方案四技术先进，经济最优，是基于网络传输 SV 的理想选择。考虑到承德市区南 220kV 变电站采用全下放布置方案，保护测控及计量装置直接采样，不经交换机传输，方案四无法实施，宜采用方案三作为实施方案。

承德市区南 220kV 变电站分端口输出 80 点/周波和 192 点/周波数据，分别送至保护、计量设备；故障录波用 SV 取自过程层网络，合并单元发送至过程层网络的数据采用 80 点/周波。

承德市区南 220kV 变电站电子式互感器配置及选型方案如下：

(1)220kV 及 110kV 各间隔间隔配置三相光纤式电流互感器，即 FOCT。

35kV 各间隔及主变中性点配置三相电学原理的电流互感器 ECT。

220kV、110kV 及 35kV 母线配置三相电子式电压互感器 EVT；

220kV 及 110kV 出线、220kV 及 110kV 主进间隔配置三相电子式电压互感器 EVT。

(2)主变、母差保护采样值通过插值法实现数据同步；非保护类的采样值同步通过 IEC61588 实现。

(3)针对罗式线圈在小电流情况下测量精度低的问题，提出了保护装置在小电流时采用低功率线圈电流，大电流时采用罗式线圈电流的方案，并考虑保护双重化时，罗氏线圈和低功率线圈均双重化设置。

(4)针对电子式互感器可能出现的数字饱和问题，合理选择电子式电流互感器额定电流，并对保护算法优化进行了探讨。

(5)合并单元分端口输出 80 点/周波和 192 点/周波数据，分别送至保护、计量设备。

4.3 电子式互感器应用若干问题分析

4.3.1 主变中性点 ECT 安装方式优化

主变中性点 ECT 接线典设方案如下图 4-2:

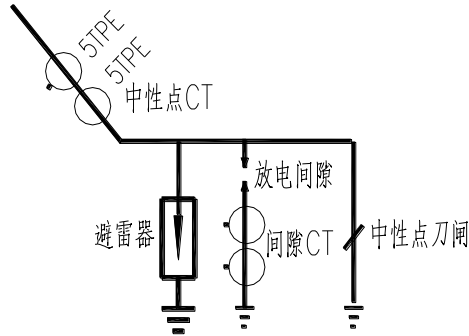


图 4-2 ECT 安装优化前

在智能变电站中,采用典设方案时,中性点电子式 CT 有可能运行在高电位侧,此时电子式 CT 采集模块的供电需采用激光长期供电,降低了激光器件的寿命,不利于变电站长期运行。

为解决此问题,可考虑将中性点电子式 CT 安装在地电位侧,这样 CT 采集模块的供电可采用 110V 直通过电缆直接供电,可大大提高可靠性。

采用此方案时,应注意避雷器放电计数器的安装位置,原方案中避雷器的放电计数器安装在地电位侧,放电计数器下面没有设备,直接与设备支柱连接即可接地;新方案中避雷器和刀闸两端并联,计数器下面还有电子式 CT,不能直接接地,需考虑放电计数器的安装和固定问题。

优化后中性点 ECT 接线如图 4-3:

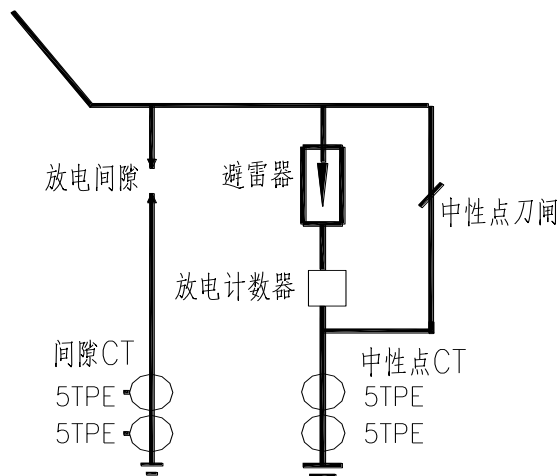


图 4-3 ECT 安装优化后

4.3.2 ECT 数字饱和时的继电保护对策

基于法拉第磁光效应的光学互感器电子式互感器在原理上没有电磁饱和问题，但是受到电子式互感器 A/D 转换位数的限制，在系统短路倍数过大时，ECT 将出现数字饱和问题，即削顶现象。

基于 IEC60044-8 标准的电子式互感器 A/D 转换位数为 16 位，保护用 ECT 能测量无直流分量(0%偏移)的 50 倍额定一次电流，或全直流分量(100%偏移)的 25 倍额定一次电流。

当某间隔 ECT 额定一次电流选择较小时，系统短路电流有可能超过额定一次电流 25 倍，在全直流分量下，ECT 将出现数字饱和。

出现数字饱和时，电流波形为平顶波，差动保护将出现不平衡电流，对正确动作带来不利影响，严重故障时可能出现保护误动情况。因此必须对数字保护问题引起重视。

消除数字饱和的影响有两个技术措施：一是合理选择 ECT 额定一次电流；二是保护装置优化算法。

4.3.2.1 合理选择 ECT 额定一次电流

对于 220kV 系统，在电子式互感器额定电流选择时需考虑直流分量的影响。电流互感器额定电流需大于系统额定电流，并且在短路时最大短路电流不超过电流互感器额定电流的 25 倍。

根据上述原则，承德市区南 220kV 变电站 ECT 额定一次电流选择如下：

220kV 线路、母联、主进：2000A；

110kV 线路、主进、母联：1000A；

35kV 主进：2500A；

35kV 所变、电容器：600A。

4.3.2.2 保护装置优化算法

数字饱和将导致电流波形畸变，但与电磁饱和有本质的不同。严重电磁饱和时，电流输出几乎为零；而严重的数字饱和时，电流波形只是被截顶，绝对数值往往较大。

根据数字饱和与电磁饱和的波形不同，对保护装置算法进行优化，可有效避免数字饱和时的误动隐患。

目前的母差保护和主变差动保护算法是基于常规电流互感器特性研发的，在保护判据上考虑较多，如波形识别、差分傅氏等；在采用常规互感器时上述判据提高了差动保护的性能，但采用电子式互感器时，被截顶的波形可能会导致误判，出现误动或拒动。

因此，有必要对保护算法和判据进行基于电子式互感器特性进行优化，在数字饱和时能够正确动作，充分发挥电子式互感器的优势，解决电子互感器额定电流选择上的二难处境：额定电流选小时会出现数字饱和，额定电流选大时会导致正常工作电流低，影响保护测量精度。

根据理论分析，基于比率差动算法的差动保护只要合理选择制动系数，就可以保证数字饱和时能够正确动作，不需要更多额外的判据^[45]。

4.4 本章小结

(1)给出承德市区南 220kV 变电站电子式互感器的配置原则和方案，介绍了合并单元与电子式互感器的接口问题，合并单元的安装位置。

(2)对于电子式互感器安装过程中所遇到的若干问题予以分析解决，优化了主变中性点 ECT 接线的接线方式，提高了电子器件的使用寿命。针对 ECT 出现的数字饱和问题，也提出了两个技术措施给以解决。

第 5 章 结论与展望

依据电力系统继电保护技术向计算机化、网络化、智能化和通信一体化的方向发展要求,常规方式下互感器二次绕组输出不与二次设备直连,引入合并单元后,由于互感器的模拟量实现了就地数字化传输,不存在容量问题,只要对二次绕组的准确级要求等技术参数相同,就可以共用二次绕组,从而有效地减少了二次绕组数量。

但另一方面,电子式互感器的使用也为继电保护技术的发展提出了新的课题,如电子式互感器通过合并单元输出的高采样率的采样数据如何能够被保护有效利用,电子式互感器在变电站安装应用过程中遇到的若干问题等都值得进一步深入研究。本文主要介绍了常规互感器与电子互感器在变电站应用中的优化配置方案,论文的主要工作和贡献如下:

(1)概述了互感器的研究背景及未来发展方向,简单介绍了传统互感器应用特点,重点介绍了电子式互感器分类及各自的特点。

(2)介绍了常规电磁式电流互感器应用特点及应用过程中存在的问题,罗列了新兴电子式互感器提高差动保护稳定性、简化保护判据、提高测量准确性和提高故障录波的可靠性的应用特点,并分析了它们对保护的影响。

(3)永定河 220kV 变电站从经济性、技术性角度考虑仍装设常规互感器,从变电站造价角度分析,全站采用“常规互感器+合并单元”模式,本章首先对“常规互感器+合并单元”模式“减组降容”可行性进行分析。列出永定河变 220kV、110kV、35kV 分别在“常规方式”和“常规互感器+合并单元”两种不同模式下互感器配置表,对比分析可知,采用“常规互感器+合并单元”模式显著减少了二次绕组的数量和容量,减少电缆长度,节约了占地面积,经济效益显著。

(4)承德市区南 220kV 变电站从技术发展趋势和先进性方面考虑,全站采用电子式互感器。给出电子式互感器的配置原则和方案,介绍了合并单元与电子式互感器的接口问题,合并单元的安装位置,合并单元采样信号同步包括四个层面:同一间隔内电流电压信号的同步测量;关联多间隔之间的电流电压信号的同步测量;关联变电站之间的电流电压信号的同步测量,主要用于输电线路保护;广域同步;又明晰了合并单元对不同采样精度装置的适应性分析;最后分析了电子式互感器在应用过程中遇到的问题并给出了解决方案。

综上所述,本文第三章结合永定河 220kV 变电站建设,采用“常规互感器+合并单元”模式,对比分析常规模式下,“常规互感器+合并单元”模式下,可

以节省电缆、实现数字化采样，同时可以减少二次绕组的数量及容量，减少了变电站的占地面积。但常规互感器因其仍存在磁饱和现象，当短路电流过大时会使二次输出波形发生畸变，造成保护误动或拒动。同时应用电子式互感器改变了传统变电站二次电缆接线复杂、抗干扰能力差、系统扩展性差、无法实现信息共享等缺陷，为变电站的建设维护带来了诸多优点。但随着过程网络的应用，网络所带来的安全、可靠性问题，过程层网络结构合理性问题，多间隔电子式互感器间的同步问题，以及数据传送的实时性问题等都为继电保护技术提出了新的课题，尽管电子式电流互感器目前还存在一定的缺陷，但是其优越性是传统互感器无法比拟的。只有合理解决以上问题，应用电子式互感器的数字化变电站才可能更好的应用。

参考文献

- [1] 蔡义清. 电子式互感器与数字化变电站[J]. 电力技术, 2009, 5: 1-10
- [2] 李映雪, 聂珣. 电子式互感器的发展前景[J]. 湖北电力, 2007, 31(6): 28-30
- [3] 王政平, 康崇, 张雪原等. 光学电流互感器的问题与解决对策[J]. 传感器技术, 2005, 24(5): 5-7
- [4] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 中国电力出版社, 2009
- [5] 方琼, 张会建, 付艳华等. 电子式互感器概述及工程应用分析[J]. 华北电力技术, 2008, 11: 22-27
- [6] 刘发胜. 电流互感器的发展状况[J]. 电气时代, 2003, (8): 84-85
- [7] 彭晟, 付保军, 赵雅囡. 传统电流互感器存在的问题及解决方法[J]. 天津电力技术, 2009, 2: 8-10
- [8] 张健, 及洪泉, 远振海等. 光学电流互感器及其应用评述[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 32-36
- [9] M. Saitoh, T. Kimura, Y. Minami, et al. Electronic instrument transformers for integrated substation systems. Proc. of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. n ASIA PACIFIC. 2002
- [10] Quo X H, Liao J S, Zhu MJ et al. An improved frequency characteristic Rogowski current transducer. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2003
- [11] 谢琼香. 电子式电流互感器传变特性及其对继电保护的影响[D]. 广东工业大学, 2013
- [12] A. Stankovic, M. Ilic, D. Maratukulam. Recent results in secondary voltage control of power systems[J]. IEEE Tran. On Power Systems, 1991, 6(1): 94-101
- [13] Li Yu, Czarkowski D, De Leon F. Optimal distributed voltage regulation for secondary networks with DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 959-967
- [14] Xing L, Datta A. Adaptive model algorithmic control[J]. Proceedings of the American Control Conference, 2001, 6: 4155-4160
- [15] 侯慧, 游大海, 尹项根等. 电子式电流互感器对距离保护的影响及应用[J]. 电网技术, 2006, 30: 349-353
- [16] 朱莹, 邵能灵, 刘海洋. 电子式互感器在泸定站智能化改造中的应用[J]. 华东电力, 2012, 40(3): 472-475
- [17] 滕林, 刘万顺, 李贵存等. 光学电流互感器及其在继电保护中的应用[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 31-34
- [18] 郑慧. 电子式电流互感器的研究[D]. 浙江工业大学, 2008
- [19] 云文兵, 管婷, 张延. 智能变电站二次设备集成优化设计[J]. 中国新技术新产品, 2013, 9: 12-13
- [20] Kojovic L. Rogowski coils suit relay protection and measurement. IEEE Computer Applications in Power, 1997(7): 47-52
- [21] 李东平. 智能变电站设计应用探讨[J]. 山西大同大学学报, 2013, 29(6): 25-27
- [22] IEC60044-8: Electronic Current Transformers[S], 2002; IEC60044-7: Electronic

- Voltage Transformers[S], 1999
- [23] Brunner C. The Impact of IEC 61850 on Protection. Developments in Power System Protection(DPSP), 2008, 14-19
 - [24] McLaren PG, Kuffel R, Wierckx R, et al. A real time digital simulator for testing relays. IEEE Trans. On Power Delivery, 1992, 7(1): 207-212
 - [25] J. Zhu, L. Yang, J. Jia and Q. Zhang. The design of Rogowski coil with wide band using for partial discharge measurements[J]. Proceedings of 2005 international Symposium on Electrical Insulating. 2005, 5(9): 518-521
 - [26] 韩本帅, 孙鹏, 林泽源等. 电子式互感器对线路差动保护的影响及应对方案研究[J]. 电工技术, 2014, 1: 23-25
 - [27] 高广玲. 电子式电流互感器传变特性及适应性保护原理研究[D]. 山东大学, 2010
 - [28] 郭耀珠, 石光, 刘华等. 保护用电流互感器 10%误差曲线现场测试及其二次负载校核[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 101-108
 - [29] 彭志强, 张小易, 高磊等. 智能变电站二次系统双重化配置技术应用分析[J]. 江苏电机工程, 2013: 38-41
 - [30] 王涛, 王爱国, 邝灿桐等. 智能变电站建设中的技术分析与探讨[J]. 广东石油化工学院学报, 2013, 23(4): 34-38
 - [31] 高峰. 装配式变电站设计的实践应用[J]. 电力与能源, 2013, 10: 90-91
 - [32] 晏胜军. 综合自动化变电站互感器容量的选择[J]. 动力与电气工程, 2009, 31:99-100
 - [33] DonaldsonEF. Hybrid optical current transformer with optical and power line energisation[J]. IEEE Pro-center, Transm Distrib, 2000, 147(5): 304-309
 - [34] A. W. Lohmann and B. Wirnitzer, Triple Correlations, Proceedings of the IEEE, 1984, 72(7)
 - [35] J. Curk, I. Kobal, G. Parkelj. Standard IEC61850 opens possibility to develop new more efficient architectures of substation automation and protection system. CIGRE B5-107. 2006
 - [36] W. Zhang, Y. N. Ning, B. C. B. Chu et al. Vibration-induced noise in a fiber lead of an optical current measurement system. Rev. Sci. Instrum, 1996, 67(2): 553-557
 - [37] Ben-Kish A, Tur M, Shafire. Geometrical separation between the birefringence components in Faraday-rotation fiber-optic current sensors[J]. Optics Letters, 1991, 16(9): 687-689
 - [38] 吴心弘. 线路纵联差动保护研究[D]. 浙江大学, 2006
 - [39] HUANG D C, SHU Y B, RUAN H J, et al. Ultra High Voltage Transmission in China: Developments, Current Status and Future Prospects[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(3): 555-583
 - [40] Giovanini R, Hopkinson K, Coury D V. A primary and back up cooperative Protection system based on wide area agents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1222-1230
 - [41] T. Sawa et al. Development of Optical Instrument Transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 884-890
 - [42] S. J. Weikel. An Electro-optic Voltage Transducer[J]. Transmission & Distribution world, 1997, 49(5): 74-83
 - [43] Ray W F, Hewson C R. Rogowski transducers for measuring large magnitude

- short duration pulses[J]. Symposium Pulsed Power, 2000, 8(3): 23-25
- [44] Schwarz H, Hudasch M. Optical Current Transformers Successful First Fields Test In a 380kv System[J]. ABB Review, 1994(3): 12-18
- [45] 张志鹏, 徐其航, 朱萍. 电子式互感器在智能变电站中的应用分析[J]. 河北电力技术, 2014, 33(3): 8-10

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

- [1] 第二作者. 电子式互感器在智能变电站中的应用分析. 河北电力技术, 2014, 33(3): 8-10

致 谢

在本论文即将完成之际，首先，我要感谢我的导师徐玉琴教授。从论文的选题、查阅资料、课题的研究到最后论文的定稿等，整个过程都是在徐玉琴老师的悉心指导和帮助下完成的。三年来，无论在学习、生活，还是工作上，徐老师都给予我莫大的支持、关心和鼓励。徐老师渊博的学识、严谨的治学态度、朴实的生活态度、敏锐的科学眼光令我深深敬佩，不仅是我一直学习的榜样，而且将使我终生受益。还有感谢河北省电力勘测设计研究院的朱萍高工，非常谢谢她在我研究生联合培养期间对我论文研究和科研项目上的指导和帮助。在此，谨向辛勤培养和教育我的导师徐玉琴老师及朱萍老师致以衷心的感谢和崇高的敬意！