

现代电力系统集成后备保护方案

董新洲¹, 曹润彬¹, 崔柳¹, 王宾¹, 施慎行¹, Dominik Bak¹, Brian Kirby², 杨霞³

(1. 清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2. 英国阿尔斯通电网公司, 英国 Stafford;
3. 中国阿尔斯通技术中心, 上海 200245)

摘要: 后备保护不可或缺, 特别作为相邻设备的远后备保护功能尤为重要。由于距离保护仅仅依赖本地信息构成, 容易实现且性能稳定, 因此, 所有高压输电线路都把距离保护作为后备保护。遗憾的是, 后备保护在大停电过程中所起的作用是消极的, 可以说它导致了电网连锁跳闸。因此, 有必要重新认识后备保护的作用及其构成方式。提出了一种集成后备保护方案, 它把同一个变电站所有被保护设备的后备保护集成在一个装置或者系统中, 而所有设备的保护只包含主保护功能。这样的方案有利于构成性能完善的后备保护方案, 也可以有效减小大停电的范围。

关键词: 继电保护; 输电线路; 后备保护; 距离保护; 集成式后备保护

Integrated backup protection scheme in modern power system

DONG Xin-zhou¹, CAO Run-bin¹, CUI Liu¹, WANG Bin¹, SHI Shen-xing¹, Dominik Bak¹, Brian Kirby², YANG Xia³

(1. State Key Lab of Power Systems Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Alstom Grid Ltd, Stafford, ST174LX, UK; 3. Alstom Grid Ltd, Shanghai 200245, China)

Abstract: Backup protection is indispensable, particularly as a remote backup protection of neighboring devices. Since the distance protection only depends on local information, which is easy to implement and has stable performance, distance protection is regarded as backup protection of transmission lines. Unfortunately, the backup protection has played a negative role during the blackouts, and sometimes caused the cascading tripping. Therefore, it is necessary to re-recognize the role and the scheme of backup protection. This paper presents an integrated backup protection scheme, which integrates all backup protection of equipments in the same substation in one device or system. And all protections to equipment only contain the main protection. Such scheme can constitute backup protection with better performance and effectively reduce the scope of the blackout.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51120175001, No. 50377019 and No. 51107062).

Key words: protective relay; transmission line; backup protection; distance protection; integrated backup protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0021-05

0 引言

近年各国大停电实例表明, 大停电多是由过负荷和振荡引发的连锁故障引起的^[1]。美加“8·14”大停电就是一个典型的例子^[2]。当时的主输电断面由5条线路组成。该事故起因是由于一回线路过负荷导致导线发热、弧垂增大, 进而造成短路故障, 继电保护动作跳闸; 之后, 负荷转移到其他线路上

又引起第二回线路过负荷, 同样导线发热、弧垂增大, 也造成故障并引起保护动作跳闸; 剩余三回线路承担了全部电能传输任务, 由于过负荷而引起保护动作跳闸, 之后系统发生振荡, 保护纷纷跳闸, 系统迅速崩溃。无独有偶, 意大利“9·28”大停电^[3], 欧洲电网“11·04”大停电^[4], 巴西“11·10”大停电^[5]、印度“7·30”和“7·31”大停电^[6]等多起事故中, 继电保护在过负荷和振荡情况下的不合理动作都充当了连锁跳闸的导火索和直接推手。

在继电保护技术日益成熟、安全稳定控制技术广泛应用、通信和计算机技术高度发达的现代化电力系统中, 发生这样的事故引人深思。本文从继电保护着眼, 剖析了现有后备保护的缺陷, 并提

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(51120175001); 国家自然科学基金重点项目(50377019); 国家自然科学基金青年基金项目(51107062); 国网智能配电网自愈控制技术研究与开发科技项目

出了满足现代电网需求的集成后备保护方案。对我国电网乃至世界电网的安全稳定运行有重要意义。

1 现有后备保护系统剖析

1.1 构成方式

电力元件包含主保护和后备保护两套系统。主保护快速有选择地切除被保护设备和故障线路。当主保护或断路器拒动时，后备保护动作切除故障，根据安装处和保护对象，可分为近后备和远后备两种。现有电力元件的主保护和后备保护集于一台保护装置，同时工作，通过动作时间动作灵敏度相配合。

1.2 主要原理

我国输电网的后备保护一般由距离保护 II 段、III 段和零序保护 II、III 段构成，部分情况可能包含距离 IV 段和零序 IV 段。然而距离后备保护其在抗过负荷、抗系统振荡和抗过渡电阻等方面的性能却并不理想。

1) 后备保护对过负荷的缺陷

过负荷是一类较常见的异常运行状态，可分为正常过负荷和事故过负荷^[7]。正常情况下，过负荷是由调度从系统层面进行协调；当系统处于紧急状况时，由安全稳定系统进行切机切负荷及电压、频率紧急控制以维持稳定。然而多起大停电事故均在控制采取措施或措施生效之前，快速动作的继电保护已经把过负荷元件切除，进一步加剧了潮流转移和系统振荡。大停电中的过负荷情况及继电保护动作参见图 1^[8]。

正常过负荷引发的继电保护跳闸往往是大停电事故倒下的第一张多米诺骨牌，而潮流转移过负荷引发的保护跳闸却是连锁跳闸的直接推手，推波助澜了系统崩溃的进程。从图 1 不难看出，如果要阻断连锁跳闸的发生，必须及时避免过负荷直接引起的不合理跳闸（如图 1 中①、③所示）和过负荷引发短路导致的间接跳闸（如图 1 中②、④所示）。然而，如果线路持续过负荷尤其是持续严重过负荷，一则可能导致线路过热损坏，二则可能因线路弧垂增大而引发短路故障。因此，在考虑线路过负荷下保护动作问题时，继电保护的基本原则如下：

a) 线路发生故障时，继电保护应快速动作切除故障元件；

b) 线路处于过负荷状态且不危及元件安全时，继电保护应确保可靠不误动，并积极采取措施减轻过负荷，降低线路故障风险和系统安全隐患。

2) 后备保护对振荡的缺陷

当电力系统发生振荡时，电压与电流之比所代

表的阻抗继电器的测量阻抗也将周期性地变化。当测量阻抗进入动作区域时，保护将发生误动作。

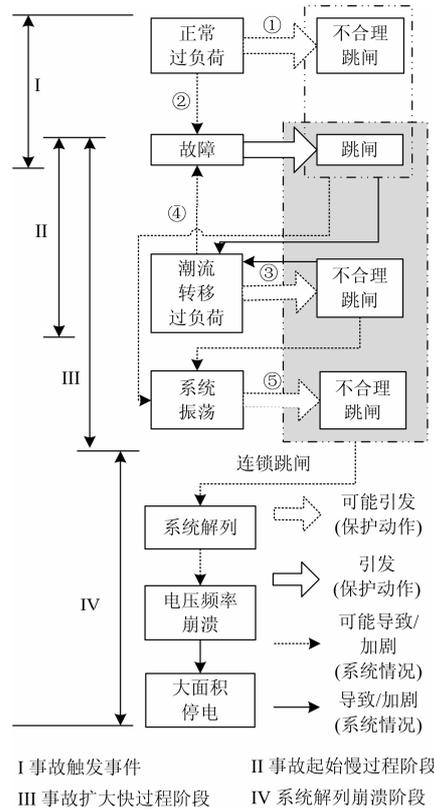


图 1 停电事故发展及继电保护动作示意图

Fig. 1 Blackout development and protective actions

3) 后备保护对过渡电阻的缺陷

过渡电阻的存在将使距离保护的测量阻抗发生变化，一般情况下是使保护范围缩短，但有时候也能引起保护的超范围动作或反方向误动。然而，当前继电保护仅能对本线路的过渡电阻进行识别，对下段线路的过渡电阻无能为力，埋下了安全隐患。

虽然后备保护存在以上缺陷，但实际运行中，保护装置拒动、保护回路其他环节破坏、断路器拒动、工作电源不正常乃至消失等时有发生，文献[9]中提出了多种极端情况下距离 III 段保护不可或缺的作用。因此，即便后备保护尤其是远后备保护，在连锁故障中产生了消极的影响，但对电力系统的安全运行仍有不可替代的作用。

2 集成后备保护方案

2.1 主要特点

针对后备保护各种缺陷，提出集成后备保护方案。其最核心的特点为：主后备分开、后备保护集成、主保护独立。为保证可靠性，主保护和集成后

备保护可采用双重化配置。

2.2 原理和工作方式

集成后备保护的工作方式(图2)是被保护设备配置单独的后备保护,但不同的后备保护之间相互配合。

集成后备保护拟采用距离保护和零序电流保护,所不同的是各个保护之间相互协调配合,包括距离保护和零序电流保护之间的配合,也包括不同保护对象之间的配合。利用本站其他元件的保护信息辅助后备保护做出更为合理的保护决策。

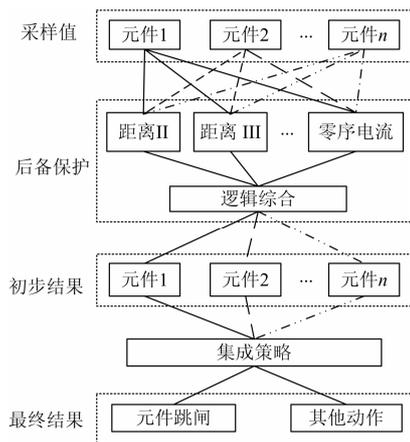


图2 集成后备保护工作方式

Fig. 2 Operating mode of integrated backup protection

2.3 硬件系统构成

基于 IEC 61850 标准,可构建集成后备保护系统,包括多功能保护控制器(Multifunctional Protection and Control Unit, MPCU)、智能终端(Intelligent Terminal, IT)、合并单元(Merging Unit, MU)三大核心部件,并通过以太网通信实现整个变电站的保护与控制,配置方案如图3所示^[10]。

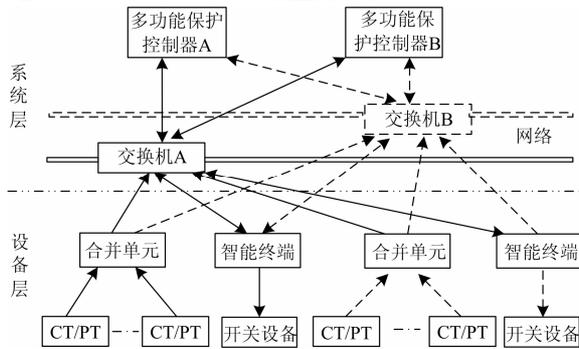


图3 智能变电站数字化集成保护控制系统结构框图

Fig. 3 The DIPC system in smart substation

不同于传统的面向间隔的保护装置利用二次电缆进行少量信息传递,在DIPC系统中,多间隔信息经合并单元采集,通过以太网发送SV报文给

多功能保护控制器,实现变电站信息共享与集成;多功能保护控制器利用站域冗余信息,提高保护性能、优化控制功能,保证系统的安全稳定运行;当有故障需要跳开本站设备时,通过以太网下发GOOSE报文给相应的智能终端,操作一次设备可靠切除故障。

3 集成的好处

集成后备保护作为一种新的继电保护方式,存在许多优点及潜在优点,本文仅举以下几例予以说明。

3.1 有效识别事故过负荷和故障

当变电站内某元件因故障或隐性故障被切除后,本变电站其他元件将承担被切除元件的部分负荷,尤以双回线中另一回为甚。通过引入时域二次扰动信息和变电站其他元件保护信息,可以有效识别事故转移过负荷并可可靠闭锁,避免因事故过负荷引发的误动作^[11-12]。

结合当前系统和元件的状态,评估线路安全支撑时间,构造自适应过负荷保护。当条件允许的情况下,通过甩负荷实现面向电力系统安全的系统保护^[13]。

3.2 构成新的振荡闭锁方案

当故障发生在双回线上的一条时,若同时得到两条线的电流、电压,可有效识别故障和振荡。

如图4所示,是系统发生振荡而无故障时同杆并架双回线上两条线路的波阻抗距离继电器比相结果,图中阴影是动作区(下同)。

该动作曲线有如下特征:

- 1) 同时进入动作区;
- 2) 比相结果角度相同,且持续一段时间;
- 3) 比相结果角度连续、缓慢变化。

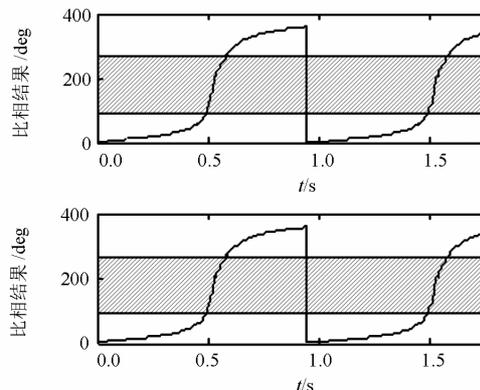


图4 系统振荡而无故障情况下同杆并架双回线动作曲线
Fig. 4 Action curve of double lines on the same tower under the system oscillations without fault condition

当只能得到一条线路信息时,这种情况会被距离保护认为是区内故障而误动作。若对比两条线路计算结果,且认为两条线路不可能同时同角度发生故障,则满足以上3个特点的结果可被认为是系统发生振荡而非故障,从而避免误动。

图5示出了在同杆并架双回线中的一条线路发生故障时,两条线路的比相结果。其特征为:

- 1) 比相结果角度不同;
- 2) 故障线路的角度发生突然、迅速的变化;
- 3) 非故障线路的角度连续、平缓变化。

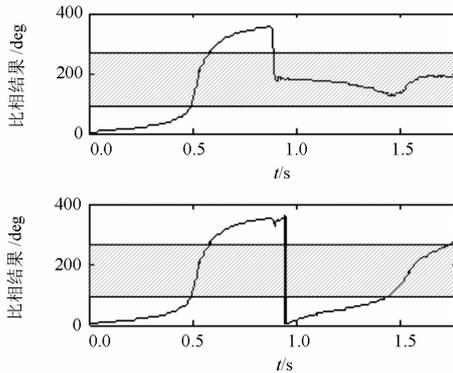


图5 系统振荡且同杆并架双回线一条发生故障动作曲线
Fig. 5 Action curve of double lines on the same tower under the system oscillations with one line fault

图6示出了在同杆并架双回线下级线路上发生故障时,两条线路的比相结果。其特征为:

- 1) 同时进入动作区;
- 2) 比相结果角度相同,且持续一段时间;
- 3) 比相结果角度突然、迅速变化。

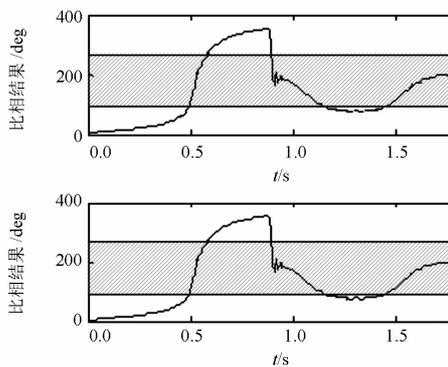


图6 系统振荡且同杆并架双回线下级线路发生故障时的动作曲线

Fig. 6 Action curve of double lines on the same tower under the system oscillations with next line fault

由以上对比可知,保护实现集成后按照如图7逻辑可以准确区分故障和振荡。

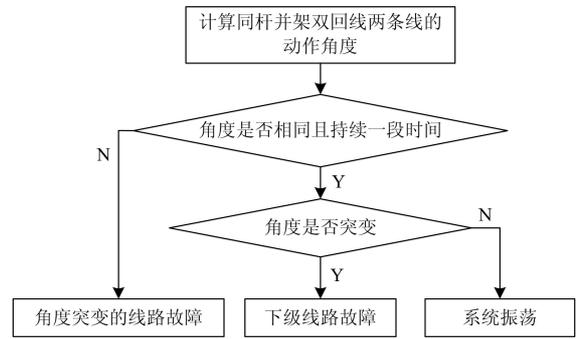


图7 同杆并架双回线区分振荡和故障流程

Fig. 7 Identification of double lines on the same tower of the system oscillations and fault

3.3 更灵敏地识别远后备保护区域的过渡电阻

现有保护不能灵敏反应下一段线路(远后备保护区)经过渡电阻的单相接地故障。基于信息共享的集成线路信息,一些横差保护算法,如横差零序电流,可以添加至启动和故障选线模块。同时,启动阈值可设得更低以提高灵敏性,用多间隔信息来确保其可靠性。

3.4 加速双回线故障切除时间,简化保护过程

如图8所示双回线系统中,当线路L2末端发生故障,保护BR2跳闸,双回线不再电气对称。线路首端保护的方向元件RS1和RS2检测出故障方向相反。线路2方向元件检测出正方向故障,而线路1检测出反方向故障。由此可以确定故障线路,并加速跳闸^[14]。

正如图9中所示,该保护算法的核心部分是故障方向判别,由负序方向元件和正序方向元件组成,分别对不对称故障和对称故障进行判别。

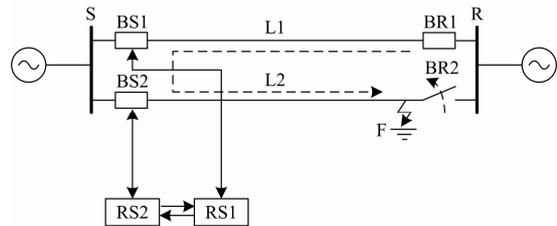


图8 双回线保护示意图

Fig. 8 Structure of the relay units

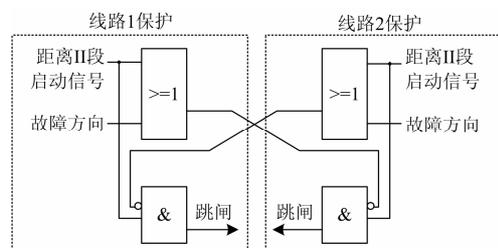


图9 双回线保护逻辑图

Fig. 9 Protection logic

4 结论

结合电力系统大停电的背景, 分析了现有后备保护所存在的问题与不足, 提出了集成后备保护方案, 主要结论如下:

1) 现代电力系统主保护性能越来越完善, 但后备保护依然需要。

2) 现有的保护方案是主保护和后备保护一体化。

3) 所提出的方案是主保护独立, 但不包含后备保护功能; 同一个变电站的后备保护集成在一个硬件平台或者系统下。

所提后备保护方案可以改善现有后备保护的性, 可以减少事故过负荷的概率, 提高系统稳定性, 降低大停电的风险。

参考文献

- [1] YU X, SINGH C. Power system reliability analysis considering protection failures[C] // Proc 2002 PES Summer Meeting, 2002
- [2] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14th blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. 2004.
- [3] UCTE. Final report of the investigation committee on the 28 September 2003 blackout in Italy[R]. 2004.
- [4] UCTE. Final report on system disturbance on 4 November 2006[R]. 2007.
- [5] 林伟芳, 孙华东, 汤涌, 等. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.
LIN Wei-fang, SUN Hua-dong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [6] New Delhi. Report of the enquiry committee on grid disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North-Eastern Region on 31st July 2012[R]. 2012.
- [7] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-7.
DONG Xin-zhou, CAO Run-bin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 1-7.
- [8] 柳焕章, 周泽昕. 线路距离保护应对事故过负荷的策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 112-117.
LIU Huan-zhang, ZHOU Ze-xin. Post-fault over-load maloperation countermeasure of transmission line distance protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 112-117.
- [9] HOROWITZ S H, PHADKE A G. Third zone revisited[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 22-29.
- [10] 董新洲, 丁磊. 数字化集成保护与控制系统结构设计方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 1-5.
DONG Xin-zhou, DING Lei. Research on design of digital integrated protection and control system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 1-5.
- [11] 刘琨, 董新洲, 王宾, 等. 基于本地信息的潮流转移识别[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 80-86.
LIU Kun, DONG Xin-zhou, WANG Bin, et al. Flow transferring identification based on local information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 80-86.
- [12] 刘琨, 董新洲, 王宾, 等. 故障动态过程对潮流转移识别的影响分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 31-36.
LIU Kun, DONG Xin-zhou, WANG Bin, et al. Analysis for impact of fault dynamic process on flow transferring identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 31-36.
- [13] 董新洲, 丁磊, 刘琨, 等. 基于本地信息的系统保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 7-13.
DONG Xin-zhou, DING Lei, LIU Kun, et al. System protection based on local information[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 7-13.
- [14] XI Hu, DONG Xin-zhou. Implementation of non-communication protection of double circuit line systems based on integrated protection platform[C] // Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, 2011: 1744-1749.

收稿日期: 2014-01-07

作者简介:

董新洲 (1963-), 男, 博士, 教授, 博导, Fellow of IET, 主要研究方向为行波保护、行波测距、行波选线、无通道保护、特高压输电线路保护、智能变电站、系统保护和小波变换应用研究; E-mail: xzdong@mail.tsinghua.edu.cn

曹润彬 (1986-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和智能变电站;

崔柳 (1984-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护和变电站综合自动化技术等。