

# 电力系统广域继电保护研究综述

何志勤, 张 哲, 尹项根, 陈 卫

(华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 分析了传统继电保护在保障电网安稳运行时存在的问题, 对基于广域信息的继电保护研究涉及的主要内容进行了综述, 包括: 在线自适应整定、潮流转移识别、基于故障元件识别的广域后备保护。在线整定的目的是根据系统运行方式的变化, 调整保护定值至最佳状态。计及的运行方式变化包括: 电力设备投退、发电机出力与负荷变化等。潮流转移识别旨在防止传统后备保护的不适当动作引发电网连锁跳闸事故, 主要方法有: 支路开断前后输电断面的有功潮流比较、相邻支路电流比较。广域后备保护利用电网多点量测信息确定故障元件的具体位置, 从根本上克服了传统后备保护整定复杂、可靠性低的问题。主要研究包括: 基于传统主保护理论的故障识别算法、广域信息的容错性算法。最后, 提出了以基于故障元件识别的广域后备保护为基础, 构建面向智能电网的广域继电保护系统, 并对其发展方向进行了展望。

**关键词:** 广域继电保护; 在线自适应整定; 潮流转移识别; 广域后备保护; 故障元件识别

中图分类号: TM 771

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)05-0125-06

## 0 引言

继电保护是保障大电网安全的第一道防线。如果保护装置在故障发生时正确、快速、可靠动作, 将有效遏制系统的状态恶化, 起到保障电网安全稳定运行的作用。反之, 则可能扩大事故, 甚至导致电网大面积停电。近 30 年来国内外频繁发生的大停电事故调查表明, 虽然引发电网大面积停电的因素很多, 但由于保护误动、拒动以及电网大范围潮流转移过程中发生的保护连锁动作, 是导致事故扩大, 乃至引发系统大面积停电的关键因素之一。此外, 传统保护采用离线整定方式确定保护定值, 由于系统结构复杂、需考虑的运行方式众多, 难以兼顾灵敏性和选择性的要求, 无法保证定值性能始终处于最佳状态。且离线整定模式下的定值修改需依靠人工完成, 存在安全隐患<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着广域同步测量和数字化变电站技术的发展与成熟, 为从根本上提高和改善继电保护的性能提供了契机。因此, 在复杂电网环境下审视传统继电保护存在的问题, 研究能够快速识别与隔离故障、简化保护整定计算的广域保护原理和配置方案, 是保障电网安稳运行的重要内容。同时, 故障的快速定位与隔离、系统运行方式更新后的保护在线自适应整定也是未来智能电网要实现的主要自愈功能<sup>[2]</sup>。

根据国际大电网会议(CIGRE)对广域保护功能的描述, 其研究可分为 2 方面: 一是基于广域信息的电网安全稳定控制研究, 主要对电网的安稳运行状

态进行监测、分析和评估<sup>[3]</sup>; 另一方面的研究则集中于利用广域信息改进和提高传统继电保护的性能。

引入基于广域信息的继电保护, 其根本目的在于: 一是防止系统发生大范围潮流转移时, 现有后备保护因线路过负荷发生误动, 引发电网连锁跳闸事故; 二是改善现有保护性能, 简化传统后备保护的整定计算, 消除保护失配、整定错误等危及电网稳定运行的安全隐患。

针对以上 2 个目的, 国内外学者已从下述 3 个层面对广域继电保护开展研究。

a. 实时跟踪电力系统运行方式的变化, 对电网进行在线自适应整定计算, 特别是在线调整后备保护(对于超高压线路主要是距离保护和零序电流保护)的定值, 提高保护的灵敏性和选择性, 使其始终处于最佳工作状态<sup>[4]</sup>。

b. 在保持现有保护配置不变的前提下, 利用潮流转移识别算法区分电网大范围潮流转移和故障, 并与区域安稳控制系统配合作用, 消除元件过负荷, 防止后备保护连锁跳闸<sup>[5]</sup>。

c. 提出基于多点同步测量信息进行故障元件识别的广域后备保护<sup>[6]</sup>。应用广域方向比较、广域电流差动算法快速判别故障元件在电网中的位置, 相邻元件之间只需通过简单的时序配合就能保证保护动作的选择性。

本文将对广域继电保护的现有研究进行分析, 从在线自适应整定、潮流转移识别、基于故障元件识别的广域后备保护 3 个层面对已取得的研究成果进行论述, 分析各条技术路线的研究难点并提出建议。在此基础上, 进一步展望了广域继电保护的未来发展, 内容包括: 广域保护系统的体系结构、广域信息的组织融合及与传统保护的协调工作机制、故障快

速识别与隔离算法、基于智能变电站的通信网络、保护系统的可靠性评价指标和灾变后的重构原则。

## 1 在线自适应整定

在线自适应整定的研究在20世纪80年代就已开始,其基本思路是:采用事件触发模式,实时跟踪电网运行方式的变化,在线调整保护的定值,防止保护失配并提高其灵敏度。基于双端电气量的主保护受系统运行方式影响不大,在线自适应整定的重点是后备保护。

系统运行方式的变化主要包括2方面:一是发电机、变压器、线路等设备的投/退及故障引起的开关跳闸;另一方面是负荷与发电机出力的变化,主要体现在电网潮流量变化。对于常见的各种运行方式,其所对应的定值可离线计算出来并存储。当该运行方式在实际应用中出现时,直接刷新定值即可<sup>[7]</sup>。

### 1.1 计及设备投退的在线自适应整定

电网中发生任意线路开断时,仅会引起断开线路相邻小范围内其他线路的短路电流水平发生显著变化,进而影响该区域内线路(或其他设备)保护的灵敏性和选择性。而远离断开线路的其他区域内的线路,短路电流水平变化较小,无需重新整定。因此,确定影响域的大小是减少在线整定计算量、提高定值刷新速度的关键。

文献[8]以支路开断前后通过保护的短路电流值为指标,提出线路运行方式变化时的影响域划分方法。文献[9]在计算短路电流时,采用外网等值来减小节点阻抗矩阵的阶数,并通过搜索电网保护的影响集和函数依赖集,最终确定零序电流保护的影响域。文献[10]采用窗口法划分电流保护的影响域,并已在实际电网中应用。

文献[11]采用改进紧邻集法,对厂站运行方式变化时的影响域进行划分。将各厂站等价为连接厂站的一条接地支路,以其阻抗变化表示厂站运行方式的变化。以最大阻抗值到最小阻抗值的变化幅度表示该厂站方式的变化幅度。将大于门槛值的厂站列入影响域中。

通过影响域确定需要刷新定值的保护后,即可对保护进行在线整定计算。由于传统分支系数的计算存在误差,文献[9]采用故障时保护的实测值取代离线整定时使用的分支系数,计算相间电流段定值。文献[11]采用感受量整定的方法计算接地距离、段定值。这2种基于实测量的整定方法准确性更高,并提高了保护的灵敏性。

### 1.2 计及负荷变化的在线自适应整定

由于在线整定计算中计及了负荷潮流的变化,使防止潮流转移时远后备保护误动成为可能。文献[12]提出:根据系统当前运行方式下的负荷功率及线路电压值和功率因数,对相间距离段进行在线整定。由于母线电压不变时,负荷功率与阻抗成反比,因而在电网发生潮流转移时,可防止距离段误动。

### 1.3 电网黑启动过程中的在线自适应整定

在系统发生大停电后的黑启动过程中,其运行方式的变化已远超出离线整定考虑的限度,因而在在线自适应整定计算更显得重要。文献[13]将与电网黑启动过程对应的整定计算分为3步,从片区电网整定动态刷新到全网正常运行整定。文献[14]进一步提出在电网黑启动初期,单电源运行方式下零序电流保护、距离保护及纵联保护的整定方法。现有文献对电网黑启动过程中的整定计算仍处于初步探讨阶段。

### 1.4 研究的难点和建议

在线自适应整定的研究时间较长,但实用化程度一直不高,其根本原因在于现有的在线整定算法未能从根本上克服传统后备保护整定配合复杂、计算量大的缺陷。其算法本身仍存在以下缺陷:

a. 系统运行方式的改变对距离保护和零序电流保护的影响不同,现有算法还只能确定单一元件投/退时的影响域划分准则,完善的保护影响域在线划分算法仍有待研究;

b. 在电网黑启动过程中,如何根据电网的恢复情况,研究快速获取保护新的最小断点集算法,并进行合理的实时整定也仍有待探索。

在当前电网强化主保护、简化后备保护的指导思想下,应利用广域量测信息,进一步完善在线自适应整定算法,简化整定配合程序,提高算法的实用性。

## 2 潮流转移识别

针对传统后备保护在潮流转移时误动而是否应被取消的问题,A. G. Phadke博士指出<sup>[15]</sup>:在变电站发生直流电源掉电并无备用电源时,距离段仍是最有效的保护手段,不能被完全取消。因此,在现有保护配置下增设基于不同潮流转移识别算法的过负荷保护一直是研究的热点。当系统发生潮流转移时,可通过闭锁保护跳闸信号,允许被保护设备合理的短时过负荷,在其热稳定极限到达前切除受端负荷或送端机组来消除或减轻过负荷,达到防止保护误动继而引发电网连锁跳闸的目的<sup>[16]</sup>。

### 2.1 输电断面有功安全性保护算法

文献[17]根据实时网络拓扑结构与潮流分布建立系统状态图,再利用有向图的邻接矩阵和路径矩阵搜索出电网的并行输电断面。该法避免了传统的潮流计算,为执行安全紧急控制提供了更充足的时间。文献[18]进一步探讨了在输电断面确定后,快速计算单一支路断开时,并行输电断面中其他支路有功潮流的方法。但也指出这种方法由于忽略了基态潮流的影响,会造成10%以内的误差。文献[19]以线路相关集表示单条支路断开时,与断开线路两端关联且受有功潮流影响较大的线路集合。利用决策树理论搜索线路相关集,进而估算出故障线路断开后相关线路承受的潮流转移。

### 2.2 基于潮流转移因子的过负荷保护算法

与上述方法不同,文献[20]引入用支路电流关



系表达的潮流转移因子(FTRF)概念,将 FTRF 矩阵通过离线计算形成。当单一支路断开时,通过 FTRF 矩阵中与该支路对应的列元素估算出其他线路的电流,通过估算值与实测值的比较来判断线路是否出现潮流转移。文献[21]通过潮流转移的虚拟折返过程,推导出系统中出现多支路连锁切除时转移因子的快速算法,避免了多次修改 FTRF 矩阵。并在计及支路切除后的系统机电暂态过程基础上,对支路电流估算进行校正。文献[22]利用支路断开前的节点阻抗矩阵数据,估算双重支路开断后的电流分布系数,原理与前述算法类似。

### 2.3 研究的难点和建议

从仿真结果看,以上潮流转移识别算法的运算时间都能满足实时紧急控制的要求。但由于支路切除时,系统中发电机、负荷支路的注入电流可能发生变化,再加上 FACTS 等非线性元件在电网中的广泛应用,很难保证转移功率(或电流)与被切除支路的原有功率(或电流)的关系是完全线性的,即算法中基于线性叠加原理的潮流分布系数和转移因子计算存在一定误差。因此,潮流转移识别算法在计算精度上仍需进一步改进。

从另一个角度看,对于输电线路而言,过负荷状态与故障状态的特性相差很大。线路发生不对称故障时,电流中会出现负序或零序分量<sup>[23]</sup>;线路发生三相短路时,保护装置的测量阻抗基本为线路阻抗,而过负荷时基本为负荷阻抗,特性也有较大差别。因此,在现有后备保护算法中,补充防止保护连锁误动的辅助判据,可以作为潮流转移识别的新思路。

## 3 基于故障元件识别的广域后备保护

这里要首先明确的是:由于广域信息传递存在延时、可靠性及安全性等局限,且现有主保护的正确动作率较高,广域继电保护与传统主保护相比无明显优势。因此,将广域信息引入到后备保护更符合实际。广域后备保护应与传统主/后备保护相协调,共同承担电网“第一道防线”的职责。

广域后备保护的核心思想在于通过电网中的多点同步测量信息,确定故障元件的具体位置,在相邻保护之间通过简单的时序配合来保证保护动作的正确性。目前的研究主要是基于主保护算法的拓展,将方向比较纵联保护和电流差动保护原理引伸到广域后备保护中,并结合智能算法提高信息的容错性。广域后备保护根据所基于的系统结构不同,可分为区域集中式、变电站集中式、分布式3类。而由于系统结构的不同,相同的算法在实现过程中也有所差别。

### 3.1 广域方向比较纵联保护

文献[24]以区域调度中心为后备保护系统中心,通过采集区域内各变电站线路保护装置的方向判别信息,构建故障方向关联矩阵,从而快速判断出故障线路并做出动作决策。网络仿真软件(NS2)的仿真结果表明主站到子站的端对端通信时延为 4.6 ms,

满足广域后备保护的通信要求。文献[25]进一步阐述了这一系统的硬、软件设计方案,该系统已通过了动模试验并在河南省投入实际运行。

文献[26-27]采用变电站集中式结构构建广域后备保护系统,将母线和变压器保护也纳入系统中。通过发电厂的主接线形式和方向元件位置形成关联矩阵,结合故障方向信息确定具体的故障元件,并通过采集间接相关元件的信息保证算法的容错性。在电网拓扑结构发生变化时,集中式结构的广域后备保护都只需调整关联矩阵对应的行和列即可与之适应。

针对集中式结构存在中心站单点失效风险的问题,文献[28]提出基于分布式结构的广域后备保护系统。各断路器和 TA 对应的智能电子设备(IED)不仅完成安装点的信息采集和运算,而且自行完成故障定位和判断。算法首先确定各 IED 的最小和最大保护区域,从而保证各 IED 只与其相关范围内的其他 IED 交互信息,并定义动作系数和关联系数,再通过相应判据算出被保护对象是否存在故障。

### 3.2 广域电流差动保护

文献[29]采用基于分布式结构的广域电流差动保护算法,提出一种基于图论方法的专家系统,根据设备状态信息及拓扑结构,在线确定各设备的主、后备保护区。属同一保护区内的保护装置相互通信即可实现差动保护。并可根据网络拓扑结构的变化,自适应调整保护区。文献[30]在此基础上引入基于预测和修正自愈策略的保护 Agent 承担通信和协调功能。仿真结果证明其在电网连锁故障发生时,比传统过流保护具有更佳的动作特性。

文献[31]将基于 Agent 的后备保护系统建立在传统线路保护基础上,采用常规保护动作信息与电流差动相结合的方法判别故障元件。在广域后备保护由于通信故障退出时,可与传统保护相协调实现后备保护功能。文献[32]在此基础上对广域后备保护系统的 Agent 模型进行了具体分析,提出了在网络阻塞、Agent 故障、断路器失灵等状态下系统的容错策略。并使用电力和通信同步仿真器(EPOCHS)对广域后备保护系统进行仿真,该仿真器实现了网络通信(NS2)和电磁暂态仿真(PSCAD)接口<sup>[33]</sup>,提高了仿真结果的可信度。

### 3.3 广域信息容错性算法

文献[32]在信息容错性方面的研究是基于集中决策系统“知晓”何种信息错误的基础上,缺乏对信息本身正确与否的识别。文献[34]针对此问题提出了基于遗传算法的故障判别原理,通过构造适合度函数进行选择、交叉、变异等进化操作,求出最优解。仿真结果表明在 5/32 的信息畸变率下保护仍能做出正确判别。文献[35]利用状态估计辨识不良数据原理,采用递归量测误差估计辨识法对不良数据进行检测和辨识,与前述算法相比,具有更高的实用价值。

### 3.4 研究的难点和建议

从保护系统基于的结构模式看,区域集中式、变电站集中式和分布式结构的广域保护系统各有优势和缺陷。区域集中式和变电站集中式结构系统的投资较小,集成的信息量更大,可以实现更多的保护功能<sup>[36]</sup>,同时也存在对决策中心依赖程度高的缺陷。分布式结构的保护系统通信量较少,不存在决策站单点失效的风险,算法更简单可靠,但也存在对 IED 性能要求较高,实用化困难的缺点。因此,如何根据电网的实际情况,选择合适的结构构建系统仍有待研究。

从广域后备保护系统基于的保护算法看,采用方向比较纵联保护的最大优点在于对 GPS 同步对时的要求不高,但如何解决逻辑量传输的可靠性及传统纵联方向保护所面临的问题还有待研究。例如:区内(区外)单相接地故障转区外(区内)异名相单相/两相接地故障时,方向元件拒动;线路非全相运行,负/零序方向元件退出后,故障时保护拒动;环网中功率分点故障,线路两侧不同方向元件可能同判为正向,导致保护误动等。采用广域电流差动保护则可避免考虑上述问题。和前者相比,由于需要多个测量点的电流值而非逻辑值,其对 GPS 同步对时的要求很高。因此,多站信息的高精度同步问题,是广域电流差动算法实用化的关键。

摆脱传统保护算法的束缚,研究新的故障快速识别与隔离算法,弥补现有保护原理存在的缺陷,也是值得探索的方向。文献<sup>[37]</sup>以两端电压/电流相量的同步测量值为基础,构建复合相量函数进行故障定位。该法与电流差动算法结合应用,可在一定程度上弥补后者受线路分布电容电流影响较大的缺陷。

## 4 研究展望

从已完成的工作看,广域继电保护还处于初步理论研究和探讨阶段,研究内容虽涉及面广,并已取得一定成果,但仍局限于某些特定问题的解决,尚缺乏总体的规划和把握。

实际上,随着广域同步测量(WAMS)和数字化变电站技术的应用,继电保护可利用的信息资源和通信条件都发生了根本性的变化,从而引发继电保护在配置、原理、整定以及实现技术等方面的重大变革。笔者认为,有必要从全局角度出发,对广域继电保护从理论和实现技术等方面开展系统的研究工作。

基于故障元件识别的广域后备保护对大范围潮流转移引发的连锁误动具有较好的防御能力,和在线自适应整定、潮流转移识别算法相比,在实现方法上更为简单可靠,从根本上克服了传统后备保护整定配合复杂的问题。由华中科技大学和北京四方继保公司分别研发的实验装置也已在河南省和广东省投入运行,迈出了实用化的第一步。因此,建议以广域后备保护为基础,构建我国面向智能电网的广域继电保护系统。

在此,对广域继电保护的研究方向提出一些建议。

a. 系统的体系架构。对基于区域集中式、变电站集中式和分布式结构的广域保护系统结构进行仿真比较和理论分析,确定其分别适用的范围,为不同电压等级、输电方式、拓扑结构、经济及技术条件的电网选择合适的系统结构提供理论依据。

从广域继电保护的通信需求出发,借鉴现有调度通信网的分层结构和基本配置,建立基于多电压等级和复杂网络环境的广域保护区域划分算法、决策中心站选择准则。

b. 广域信息组织与融合机制。研究不同来源、重要性和应用要求的多点信息的组织模式及权值设置准则,建立控制中心集中决策与保护控制单元分布自治、传统保护与广域保护协调动作的工作机制,改善传统主保护的性能,简化传统后备保护的整定计算,从而优化整个保护系统的动作机理和故障判别。

c. 快速故障识别与隔离算法。完善现有的广域保护算法,克服传统电流差动保护、纵联方向保护存在的缺陷。构思基于网络拓扑实时跟踪和数据高容错性的新型算法,与现有保护算法互补。在此基础上,制定健全的保护跳闸策略,防止大范围潮流转移引起的保护不正确动作,提高整个保护系统在电网复杂运行方式下的应对能力。

d. 通信网络的结构。IEC61850 标准规范了变电站内保护/控制 IED 之间的通信行为和相关要求<sup>[38]</sup>,即将发布的 IEC61850-90-1(变电站间通信)已包含了基于双端量测信息的电流差动、纵联距离和方向保护通信标准。广域继电保护可以此为基础,建立广域继电保护系统的数据模型和通信服务模型,制定基于智能变电站通信平台的数据传输和交互机制,根据广域信息的数据传输速度、精度和同步要求,设计其通信网络。

e. 广域继电保护系统的可靠性。结合传统继电保护的可靠性评估算法,研究适合广域继电保护可靠性分析的数学模型,设计统一的可靠性评价指标。

f. 研究在自然灾害导致的部分电网通信线路损坏、信息失效情况下,利用基于同步数字体系(SDH)光纤环网的迂回通道,恢复广域信息传输和交互的保护系统自适应重构原则,提高系统应对灾变的能力。

### 参考文献:

- [1] 王明俊. 大电网继电自动装置的隐藏故障、脆弱性和适应性问题[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(3): 1-5.  
WANG Mingjun. Hidden failure, vulnerability and adaptability of relaying automations in large interconnected power systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3): 1-5.
- [2] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.  
XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [3] ADAMIAK M G, APOSTOLOV A P, BEGOVIC M M, et al. Wide area protection—technology and infrastructures [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 601-609.



- [4] 段献忠,杨增力,程道. 继电保护在线整定和离线整定的定性性能比较[J]. 电力系统自动化,2005,29(19):58-61.  
DUAN Xianzhong,YANG Zengli,CHENG Xiao. Performance analysis of relay settings determined according to off-line calculation and on-line calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(19):58-61.
- [5] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):1-6.  
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(7):1-6.
- [6] 丛伟,潘贞存,丁磊,等. 满足“三道防线”要求的广域保护系统及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2004,28(18):29-33.  
CONG Wei,PAN Zhencun,DING Lei,et al. Wide area protection system to defend three different types of power system stability problems and its application[J]. Power System Technology, 2004,28(18):29-33.
- [7] 曹国臣,韩蕾,祝滨. 大电网分布式自适应继电保护系统的实现方法[J]. 电力系统自动化,2000,24(13):19-22.  
CAO Guochen,HAN Lei,ZHU Bin. Method of adaptive protection systems with distributed structure for large scale transmission network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(13):19-22.
- [8] 曹国臣,蔡国伟,王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决方案[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):51-56.  
CAO Guochen,CAI Guowei,WANG Haijun. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(10):51-56.
- [9] 宋少群. 基于广域网和多 Agent 的电网自适应协调保护的研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2007.  
SONG Shaoqun. Research on multi-Agent and WAN based adaptive coordinated protection[D]. Beijing:North China Electric Power University,2007.
- [10] 吕颖,吴文传,张伯明,等. 电网定值在线整定系统的开发与实现[J]. 电网技术,2008,32(8):15-20.  
LÜ Ying,WU Wenchuan,ZHANG Boming,et al. Development and application of an on-line relay setting coordination system[J]. Power System Technology,2008,32(8):15-20.
- [11] 李银红. 超高压电力系统继电保护整定计算理论研究与系统开发[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2003.  
LI Yinhong. Relay coordination theory study and system development of ultra-high-voltage power system[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2003.
- [12] 曾耿晖,刘玮. 继电保护在线整定系统的探讨[J]. 继电器,2004,32(17):38-42.  
ZENG Genghui,LIU Wei. Discussion about on-line coordination systems of relay protection in power system[J]. Relay,2004,32(17):38-42.
- [13] 段惠明,何飞跃,李志宏,等. 基于 EMS 和故障信息系统的在线定值管理系统构想[J]. 电力系统自动化,2006,30(10):97-99.  
DUAN Huiming,HE Feiyue,LI Zhihong,et al. Online setting management system based on EMS and fault information system[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(10):97-99.
- [14] 李阳坡,顾雪平,刘艳. 电力系统黑启动过程中线路继电保护的配置与整定[J]. 电力系统自动化,2006,30(7):89-92.  
LI Yangpo,GU Xueping,LIU Yan. Determination of line protection scheme and settings during power system black-start[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):89-92.
- [15] HOROWITZ S H,PHADKE A G. Third zone revisited[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(1):23-29.
- [16] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制[M]. 北京:中国电力出版社,2007:121-133.
- [17] 周德才,张保会,姚峰,等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):32-38.  
ZHOU Decai,ZHANG Baohui,YAO Feng,et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):32-38.
- [18] 张保会,姚峰,周德才,等. 输电断面安全性保护及其关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(21):1-7.  
ZHANG Baohui,YAO Feng,ZHOU Decai,et al. Study on security protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(21):1-7.
- [19] 张玮,潘贞存,赵建国. 新的防止大停电事故的后备保护减载控制策略[J]. 电力系统自动化,2007,31(8):27-31.  
ZHANG Wei,PAN Zhencun,ZHAO Jianguo. New load shedding control strategy for backup protection against cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(8):27-31.
- [20] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等. 基于潮流转移因子的广域后备保护方案[J]. 电网技术,2006,30(15):65-71.  
XU Huiming,BI Tianshu,HUANG Shaofeng,et al. A wide area backup protection scheme based on flow transferring relativity factor[J]. Power System Technology,2006,30(15):65-71.
- [21] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等. 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):24-30.  
XU Huiming,BI Tianshu,HUANG Shaofeng,et al. Flow transferring identification algorithm for multi-branches removal event with consideration of transient phenomena[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(16):24-30.
- [22] 王艳,张艳霞,徐松晓. 基于广域信息的防连锁过载跳闸保护[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):37-41.  
WANG Yan,ZHANG Yanxia,XU Songxiao. A protection scheme against chain over-load trip based on wide-area information[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(10):37-41.
- [23] PHADKE A G,THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. NY,USA: Springer,2008:211-213.
- [24] 王冬青,苗世洪,林湘宁,等. 基于光纤网的后备保护系统的研制[J]. 电网技术,2006,30(7):21-25.  
WANG Dongqing,MIAO Shihong,LIN Xiangning,et al. Development of a novel backup protection system based on optic-fiber network[J]. Power System Technology,2006,30(7):21-25.
- [25] 苗世洪,刘沛,林湘宁,等. 基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):32-36.  
MIAO Shihong,LIU Pei,LIN Xiangning,et al. A new type of backup protective system in wide area network based on data network[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(10):32-36.
- [26] 杨增力,石东源,段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):77-81.  
YANG Zengli,SHI Dongyuan,DUAN Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):77-81.
- [27] 张保会,周良才. 变电站集中式后备保护[J]. 电力自动化设备,2009,29(6):1-5.  
ZHANG Baohui,ZHOU Liangcai. Centralized substation backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(6):1-5.
- [28] 丛伟,潘贞存,赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(21):8-14.  
CONG Wei,PAN Zhencun,ZHAO Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(21):8-14.
- [29] 苏盛,LI K K,CHAN W L,等. 广域电流差动保护保护区划分专家系

- 统[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 55-58.
- SU Sheng, LI K K, CHAN W L, et al. An expert system for wide area protection system protection zone selection[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 55-58.
- [30] SU Sheng, LI K K, CHAN W L, et al. Agent-based self-healing protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 610-618.
- [31] 王晓茹, HOPKINSON K M, THORP J S, 等. 利用 Agent 实现新的电网后备保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 57-62.
- WANG Xiaoru, HOPKINSON K M, THORP J S, et al. Novel backup protection system for the electric power grid using Agent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 57-62.
- [32] 童晓阳, 王晓茹, 汤俊. 电网广域后备保护代理的结构和工作机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 91-98.
- TONG Xiaoyang, WANG Xiaoru, TANG Jun. Study on the structure and working mechanisms of wide-area backup protection agents for power networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 91-98.
- [33] GIOVANINI R, HOPKINSON K, CORY D V, et al. A primary and backup cooperative protection system based on wide area agents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1222-1230.
- [34] 汪咏, 尹项根, 赵逸君, 等. 基于遗传算法的区域电网智能保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 40-44.
- WANG Yang, YIN Xianggen, ZHAO Yijun, et al. Regional power network intelligent protection based on genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 40-44.
- [35] 吕颖, 张伯明, 吴文传. 基于增广状态估计的广域继电保护算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 12-16.
- LÜ Ying, ZHANG Boming, WU Wenchuan. Wide area protection algorithm based on extended state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 12-16.
- [36] 毕妍秋, 赵建国. 基于 OPNET 的电力系统广域信息网络研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 103-107.
- BI Yanqiu, ZHAO Jianguo. Wide-area information network of power system based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(6): 103-107.
- [37] JIANG Joeair, CHEN Chingshan, LIU Chihwen. A new protection scheme for fault detection, direction discrimination, classification, and location in transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 34-42.
- [38] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 69-85.

(责任编辑: 李 玲)

#### 作者简介:



何志勤

何志勤(1982-), 男, 江西九江人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统广域保护与控制(E-mail: zhiqinhe@smail.hust.edu.cn);

张 哲(1962-), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、电力设备监录技术、高压输电线路故障定位及超导电力新技术;

尹项根(1954-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制、故障仿真与状态检测、光电及电力电子应用技术;

陈 卫(1970-), 男, 广东东莞人, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护、数字化变电站技术及数字信号处理在电力系统中的应用。

## Overview of power system wide area protection

HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, CHEN Wei

(Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The existing problems of traditional protections are analyzed and the main contents involved in the study of protection based on wide-area information are reviewed, including: on-line adaptive setting, flow transfer identification and wide area backup protection based on fault component identification. The on-line setting is to adjust the protective settings to the optimal state according to the change of system operation modes, including the change of electric device on-off state and the change of generator output and loads. The flow transfer identification is to prevent the improper protective actions which may lead to cascading trips, including the comparison of transmission section active powers and adjacent branch currents before and after branch break. The wide area backup protection utilizes multiple node measurements to locate the fault component, which has easier protection setting and higher reliability than the traditional back-up protection, including the fault identification algorithm based on traditional main protection theory and the information error tolerance algorithm. A wide area protection system based on wide area back-up protection is presented for smart grid and its development trend is prospected.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50837002, 50877031).

**Key words:** wide area protection; on-line adaptive setting; flow transfer identification; wide area backup protection; fault component identification