大电网继电自动装置的隐藏故障、脆弱性和适应性问题

王明俊
(中国电力科学研究院,北京 100085)

摘要: 市场环境多变和不确定因素增加,特别是几次大停电以及信息技术进步的影响,对继电自动装置提出了一些新的要求。介绍了当前自动化信息化主要的研发热点:开发快速同步监控装置、加强动态安全评估的预防性控制、某些变电站间隔级单元信息纳入 EMS 管理。为解决涉及继电自动装置的隐藏故障监视、电力系统脆弱性分析和适应性控制等问题,以及当前出现的新型系统监视保护和动态分析预测进行了分析和讨论。

关键词: 继电自动装置; 信息技术; 隐藏故障; 脆弱性; 适应性控制; Agent
中图分类号: TM 774 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-6047(2005)03-0001-04

1 继电自动装置面临的挑战

本文所分析讨论的继电自动装置,主要是保证大电网安全运行、特别是旨在紧急状态下为防止大面积停电所分布设置的各种系统继电保护(不涉及系统参数的元件保护除外)、稳定补救等自动化装置。这些装置的共同特点是"事先整定、实时动作、定期检验"。电力系统垄断经营时期,这些装置所面对的是数据和算法都比较准确的电力系统。事先通过分析计算所确定的整定值(如继电保护根据电力系统最大、最小和相继动作等运行方式所计算得出的整定值)或动作条件,一般都在预期范围,保证了电力系统的安全运行。

电力市场的开展,对电力系统的安全经济运行带来了两方面的影响:一是最大限度开展的市场交易,可能使安全裕度缩小到极限;二是众多市场参与方(监管机构、能量市场、独立发电、大用户、售电服务等)日益所起的重要作用,给电网运行增加了多变和不确定因素。电力系统安全裕度的缩小,大大提高系统继电保护、稳定补救和无功补偿等装置的重要性。但另一方面,原来面对数据和算法都比较准确的电力系统,却增加了多变和不确定因素。总之,两个方面都对这些继电自动装置提出了挑战。

当前,电力系统运行中最受国内外关注的问题,莫过于如何防止大面积停电和加速停电后的恢复控制了。根据分析[1],导致美加和意大利等几次大面积停电的共同原因有:发电机/线路检修和重负荷运行;线路故障跳闸或保护动作引起其他线路过负荷,以及不正确整定造成保护和控制的误动或不必要动作导致故障扩大;无功电压支持不足;不适当的超前维护;EMS/SCADA 系统提供信息不足,调度员未能制止故障扩大;不适当的规划/运行安排;自动装置未能防止进一步过负荷、制止电压下降或正确进行系统解列。可见,大停电原因涉及到一次装备系统结构、运行规划管理和二次自动化信息化三个方面。其中,近半数原因直接或间接与继电自动装置、SCADA/EMS 等自动化信息化系统有关。

为此,国内外的电力部门,在探讨完善、改进一次装备系统结构和运行规划管理的同时,正加强对自动化信息化系统的分析研讨和开发工作。

2 当前的研发热点[2]

2.1 快速同步监控装置

在功角遥测基础上发展起来的广域测量系统 WAMS(Wide Area Measurement System)特别引人关注。基于相量测量装置 PMU(Phase Measurement Unit)所组成的 WAMS,既支持具有快速准确特点的状态估计,使得对电压失稳及低频振荡的监视报警、系统动稳极限输电功率的确定等高级系统分析成为可能;还可与稳控装置终端相结合,组成广域稳定控制的快速保护系统。

2.2 加强动态安全评估的预防性控制

预防性控制软件中,除传统 *N*-1,*N*-2 安全准则的静态安全分析外,当前主要加强包括暂态稳定、电压稳定、频率稳定在内的动态安全分析。定时启动的预防性控制软件紧密跟踪电网运行,一旦发现系统薄弱环节就及时提出网络重构、调整保护定值或稳定补救方案的安全对策。

动态安全评估计算量大,往往要求超实时仿真。为此,还发展了并行计算技术。

2.3 某些变电站间隔级单元纳入 EMS 管理

传统上 SCADA/EMS 主要完成正常状态下的预防性控制,紧急状态下的紧急控制主要由继电保护和稳定补救装置承担。

收稿日期:2004-12-06

鉴于大停电多数直接或间接与继电自动装置有关,以及保护相继动作演变成灾难性故障的事实,某些关键的变电站间隔级单元信息(如保护、故障录波、故障测距、事件顺序记录、开关监视等),将纳入EMS管理,用以实现隐藏故障监视、系统脆弱性分析、事件系列发展预测及提供适应性控制对策等。

诸多研发热点中,由美国国防部和电力研究院(EPRI)发起、华盛顿大学等4个单位联合开发的电力基础设施战略防护系统SPID(Strategic Power Infrastructure Defense system)[3]较为引人注目。该系统采用面向Agent(OA)技术的三层Multi-Agent结构:底层为反应层(包括发电、保护),中层为协作层(包括事件/警报过滤、模型更新、故障隔离、频率稳定、命令翻译),高层为认知层(事件预测、脆弱性评估、隐藏故障监视、网络重构、恢复、规划、通信)。主要功能有脆弱性评估(电力和通信系统的快速在线评估)、故障分析(隐藏故障监视)、自愈战略(自适应卸负荷、发电、解列和保护)、信息和传感(卫星、因特网、通信系统监视和控制)等。用以防护来自自然灾害、人为错误、电力市场竞争、信息和通信系统故障、蓄意破坏等对电力设施的威胁。

3 涉及继电自动装置的问题

3.1 隐藏故障监视

保护隐藏故障和一般硬件故障、过时整定及人为差错不同,必须由其他事件才能揭露其隐藏缺陷。

保护误动反映的是接线逻辑正确、动作后才能判断是否误动,故需定期离线检测。隐藏故障反映的则是接线逻辑出错、正常时即可在线检测监视。现以3段式线路距离保护为例,说明隐藏故障和误动作的区别。如图1所示,T_2正常时闭合属于隐藏故障,但其缺陷只有在保护第Ⅰ段故障而导致第Ⅱ段误跳时才被揭露。显然,如此时T_2常开仅Z_1闭合、Z_2和Z_3未动则属于保护误动,而非隐藏故障。

3.2 电力系统脆弱性分析

由继电自动装置导致的电力系统脆弱性,与隐藏故障不同,正常时保护接线逻辑正确,不能通过监视事先发现问题。只有当脆弱区发生故障、保护接线逻辑中有关部件失灵时才有所反映而改造成不希望的跳闸。因此,只能通过分析发现问题,并采取相应的安全对策。

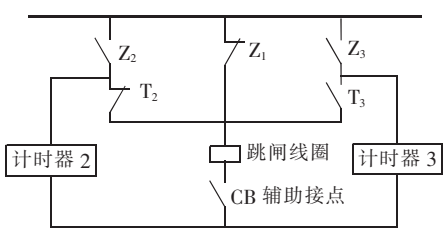

图1 隐藏故障和保护误动的区别

Fig.1 Difference between hidden failure and relay misoperation

现以图2所示500 kV联络线L的方向闭锁距离保护为例,说明脆弱性和隐藏故障的区别(图中○表示整定值为1.2线路阻抗的方向闭锁距离保护、当方向闭锁失灵时所出现的脆弱区)。如图所示的联络线L,为了瞬时快速除全线故障,线路两侧采用整定值1.2倍于线路阻抗(避免线路馈入电流影响而导致保护感受阻抗减少)的方向闭锁距离保护(任意侧线路外故障均闭锁两侧保护)。显然,这就可能存在超越线路阻抗20%的脆弱区(图中圆圈部分)。当脆弱区内发生故障而保护接线逻辑中的方向闭锁失灵时,就将造成该线路不希望的跳闸。文献[4]曾对179母线系统的两处脆弱性进行仿真分析,一处即将由此导致连锁反应的严重后果。

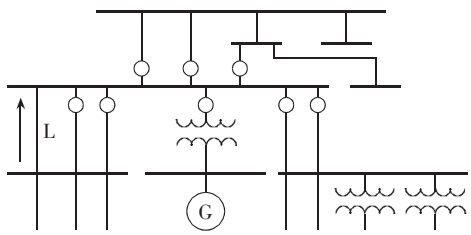

图2 电力系统的脆弱区

Fig.2 Vulnerable region of power system

3.3 继电自动装置的自适应问题

"事先整定、实时动作"的继电自动装置,如其整定值或稳定补救方案不适应当前多变的系统环境时,就可能导致如第1节大停电原因分析中所述:"不正确整定造成保护和控制的误动或不必要动作导致故障扩大",这就提出了继电自动装置的适应性控制问题。

和隐藏故障监视、脆弱性分析不同,继电自动装置的适应性控制与装置本身无关,是一个应用环境问题。当前研发热点的动态安全评估中,发现问题时对有关保护定值或稳定补救方案进行修改或调整,就是一个提高继电自动装置的适应性控制水平的有力措施。但继电自动装置本身的自适应性控制,却是一个有待进一步研发解决的问题。

4 信息技术的发展提供解决问题的途径

以继电保护为代表的继电自动装置专业性很强,传统上以"事先整定、实时动作、定期检验"为特征,很少触及到装置或系统的经常自检、远方监控、信息共享、动态修改定值等自适应问题。

在当代信息技术的推动下,继电保护技术正在从传统的模拟式、数字式稳步地进入信息技术(IT)领域,从而导致上述传统格局的变化。由于继电保护在电力系统安全运行中所处的重要地位,其发展必然是稳步渐进的[5]。

DSP数字信号处理技术的应用,使传统模拟式的各种继电自动装置跨过变模数变换而直接进入数字化微机化领域,作为智能电子设备IED、独立或在

各种自动化系统终端中发挥测量、控制和保护作用。与此同时，传统的“事先整定”和“定期检验”，正稳步向远方投切、监视、整定和自检的方向发展。

交流直接采样所得到的各相电流电压值，通过信息共享为多种保护的集成，以及集测量、控制和保护于一体的综合自动化奠定了技术基础。如线路主保护和后备保护、变压器差动保护和过流保护的集成，存储用于扰动故障分析的事件报告(1/4 周期或 1/16 周期分辨率)和事件顺序记录，保护超温和断路器损耗监视报警，由间隔级单元组成的变电站综合自动化，以及与柱上开关配合的馈线自动化等，彻底告别传统上“一事一物”的单项自动化状态。

DSP 中小波变换的应用，突破傅里叶变换基波谐波的纯频域局限，同时提供一个信号的时域和频域的局部化(持续几个周期)信息。传统上承担电力系统紧急状态下安全控制任务的继电自动装置，素以识别和捕捉电力系统故障信息为已任。小波变换的应用，使各种继电自动装置从捕捉故障的稳态故障信号发展到捕捉故障的动态瞬变信息。当前，小波变换已在输电系统中的行波故障测距和配电系统中的接地选线发挥了作用，并推动了动态继电保护装置的开发。

上述继电自动装置中信息技术的发展，为解决当前继电自动装置面临的问题，提供了有力的支持。这就是：深化自检功能，解决隐藏故障问题；发展到状态检修，解决脆弱性问题；通过系统协调，解决适应性问题。

4.1　从功能自检到逻辑监视

信息技术推动下的综合自动化，使得传统上由各个分立部件组成的继电自动装置走向一体化，大大提高了装置的集成度，但却为此增加了装置中分立部件的隐蔽性。因此，在发挥 IED 型继电自动装置的经常自检功能时，应将整个装置的方案逻辑监视包括进去，以便及时发现隐藏故障，而无需在控制中心设置专门的保护隐藏故障监视功能。

如图 1 所示，当检测出 Z_2 未动而 T_2 闭合时，即可断定隐藏故障所在，并通过远方监视功能向控制中心发出相应的预警。

4.2　从逻辑监视到状态检修

继电自动装置可能导致的电力系统脆弱性，必须在脆弱区故障时才被揭露。因此，无法在正常状态下进行安全监视。这时，必须从方案逻辑监视深入到状态检修，才能发现问题。

如图 2 所示的方向闭锁距离保护，当所保护的线路外部故障时，方向闭锁应立即启动发出闭锁信号，防止所保护的线路开关跳闸。但正常时并不知道闭锁部件是否失灵，只有通过在线测试进入状态检修，才能发现问题，并向控制中心报警。

由于脆弱区故障导致线路开关的不希望跳闸，不一定在当前环境下会引发连锁反应而产生严重后果。因此，控制中心在收到警报后，除采取措施排除装置故障外，还必需及时进行必要的脆弱性分析，以决定是否采取相应的安全对策。

显然，电力系统关键部位继电自动装置的状态检修，将大大浓缩控制中心脆弱性分析的目标，有力增强电力系统的鲁棒性。

4.3　从静态整定到动态协调

继电自动装置的适应性控制，虽然和隐藏故障、脆弱性不同，不属于装置本身的隐患。但信息技术的发展，当代具有通信和编程能力的继电自动装置同样提供解决问题的基础。如前所述 SPID 所采用的面向 Agent 的技术路线，就可为实现继电自动装置的适应性控制提供一个新途径。

如图 3 所示，SPID 系统面向 Agent 的反应、协作、认知三层结构，相当于当前广泛使用的集反应式(reactive)和认知式(cognitive)Agent于一体的混合式(hybrid) Agent[6]。

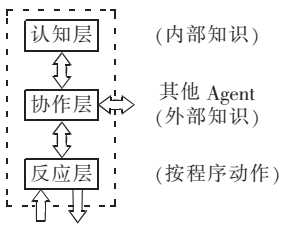

图 3 SPID 系统结构示意图

Fig.3 SPID system configuration

Agent 是将知识和使用它的一组操作或过程封装在一起得到一个实体，具有结构和属性，并可通过消息互相通信。Agent 特有的自治性和主动性，可独立完成其目标而不需外界指令或感知环境变化时通过规划实现其目标。单个 Agent 拥有解决问题的不完全的信息或能力，没有系统全局控制。但可通过相关 Agent 间的协调和协作组成 Multi-Agent 系统解决复杂的全局性问题。

图 3 中无通信能力的反应式 Agent，相当于传统上“事先整定、实时动作”的继电自动装置，根据程序安排自主作出反应，而无须外部指令控制。但保护定值或稳定补救方案的设定和修改只能离线进行。

加上具有通信能力的协作层后，当预防性控制软件发现系统薄弱环节、需对有关保护定值或稳定补救方案进行修改和调整时，就可依靠外部知识协作、对反应参数或程序进行修改和调整，以提高装置的适应性水平。这种通过不断修改系统控制参数来改进系统执行能力的感知型学习，不涉及与具体任务有关的知识，但对外部知识依赖性强，在通信中断的情况下难于达到自适应的水平。

如进一步加上与具体任务有关的内部知识组成认知式 Agent 后，即使通信中断，也可根据内部积累的知识作出自适应反应，充分体现出 Agent 的自主性。

应该看到，反应式 Agent 包括协作层在内，虽然智能水平较低，但具有包括来自控制中心的精确解背景，易为领域专家接受。即使如此，完全进入知识领域的认知式 Agent，具有不可替代的智能水平，在精确解难于实现自主性的情况下，仍不失为研发继电自动装置自适应控制的一个新途径。

5 两个值得注意的研发方向

继电自动装置中信息技术的发展,不仅为解决当前继电自动装置面临的问题提供有力支持,还推动了新型继电自动装置和系统的发展,特别是高精度相量测量装置PMU的问世,引发了两个值得注意的研发方向。

5.1 集中式问题求解的动态监测保护系统

传统上,继电保护分为与系统参数有关的系统保护(如距离保护、过流保护等)和与系统参数无关的元件保护(如变压器保护、发电机保护等)。但两种保护都不具备通信能力,属于按"事先整定、实时动作"的分布式问题求解模式。

DSP中小波变换的应用和高精度测量装置PMU的问世、与全球定位系统GPS结合,开拓了测量装置与通信结合、开发新型装置和系统的新局面:从功角遥测、故障测距,发展到动态安全评估系统。

如图4所示(图中,SPC为系统保护中心,SPT为系统保护终端,LPC为本地保护中心;SPT_1~SPT_5分别对应母线L_1~L_5),动态安全评估系统中的PMU加上保护功能构成系统保护终端SPT,即可发展成为特殊保护系统[1]。这种保护突破传统继电保护的分布式问题求解,进入到集中式问题求解模式。

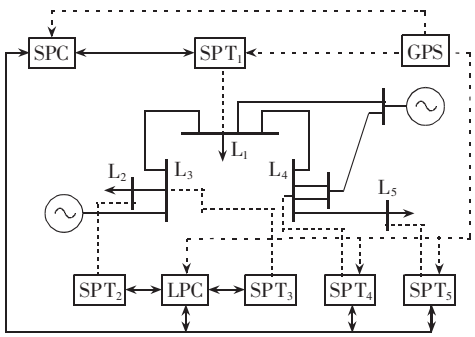

图4 特殊保护系统配置图

Fig.4 Special protection system configuration

测量装置与通信技术结合的各种新型监测、控制和保护系统,已开始进入实用阶段并正在向前发展。

5.2 分布式问题求解的动态监测保护装置

和集中式问题求解的研发方向相反,分布式问题求解旨在就地捕捉动态信息规律特征、研发识别甚至预测动态过程发展趋势的新热点正在悄然兴起。

和主要依靠静态模型和动态特性的分析计算不同,这种称之为直接测量推算的方法,主要依靠实时测量数据。DSP数字信号处理技术,特别是高精度同步采样技术的发展和完善,为直接测量推算奠定了基础。

电力系统的各种故障和扰动信息中,蕴涵有各种特征信息。通过快速傅里叶变换/小波变换,可以获取任意时段内这些涉及时、频两域的有关数据。特征信息和经典控制论的结合,即可对电力系统的动态行为进行实时分析和趋势预测。

直接测量推算较之模型分析计算具有实时性强的突出优点,在识别和分析电力系统动态过程、预测事件发展上具有良好的应用前景。因而形成了当前研发的一个新热点,预期不久将会有各种新型的直接测量推算的动态监测保护装置问世。

6 结语

a. IT信息技术的进步,市场环境下安全裕度缩小、多变和不确定因素增加,加上几次大停电的震撼,对电网安全控制既提出了挑战,也带来了机遇。

b. 当前的研发热点是,开发快速监控装置提升SCADA/EMS和稳定监控功能、动态安全评估的预防性控制和某些间隔级单元纳入EMS管理。

c. 研发热点中对继电自动装置提出了隐藏故障监视、脆弱性分析和适应性控制等新问题。

d. 继电自动装置中信息技术的发展,提供了从功能自检到系统监测、从系统监视到状态检修和从静态整定到动态协调等解决问题的途径。

e. 继电自动装置中信息技术的发展,还推动了集中式问题求解的新型测量、控制、保护系统和分布式问题求解的新型动态检测装置的发展。

参考文献:

[1] NOVOSEL D,BEGOVIC M M,MADANI V. Shedding light on blackouts [J]. **IEEE Power & Energy**,2004,2 (1):32-43.

[2] 王明俊. 新一代能量管理系统的开发和分布式问题求解的新途径[J]. 电网技术,2004,28(17):1-5,10.
WANG Ming-jun. Development of new generation of energy management system and new approach to distributed problem solving[J]. **Power System Technology**,2004,28(17):1-5,10.

[3] LIU Chen-ching. Strategic power infrastructure defense[A]. **IEEE Power Engineering Society General Meeting[C/CD]**. USA:IEEE,2004.

[4] ELIZONDO D C,de la REE J. Analysis of hidden failures of protection schemes in large interconnected power system [A]. **IEEE Power Engineering Society General Meeting[C/CD]**. USA:IEEE,2004.

[5] 王明俊. 继电保护中的信息技术 [J]. 电网技术,1999,23(1):1-3,5.
WANG Ming-jun. Information technology in the field of protective relaying[J]. **Power System Technology**,1999,23(1):1-3,5.

[6] 王明俊. CBR和Multi-Agent在电网安全控制中的应用[J]. 电网技术,2004,28(8):1-5.
WANG Ming-jun. Application of case based reasoning and Multi-Agent in power system security control [J]. **Power System Technology**,2004,28(8):1-5.

(**责任编辑:** 李 玲)

作者简介:

王明俊(1931-),男,浙江杭州人,中国电力科学研究院咨询委员,原院副总工程师,长期从事计算机及电力系统自动化工作(**E-mail**:mjwang@public.bta.net.cn)。

Hidden failure, vulnerability and adaptability of relaying automations in large interconnected power systems

WANG Ming-jun

(Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: The market environment change and uncertain factor increase, especially the influence of several large-area blackouts and information technology progress, bring forward some new requirements to relaying automations. Recent researches about automation informization focus on: development of the rapid synchronous supervisor, preventive control for improving dynamic security estimation, integration of substation cell information into EMS. The hidden failure, power system vulnerability and adaptive control regarding relaying automations are thus discussed, as well as system dynamic monitoring, predicting, protection and analysis.

Key words: relaying automation; information technology; hidden failure; vulnerability; adaptive control; Agent