自适应继电保护及其前景展望

葛耀中
（西安交通大学电气工程学院　710049　西安）

摘　要　自适应继电保护是计算机继电保护发展的一个重要方向。在讨论自适应继电保护的作用、意义和分析其发展条件的基础上，指出了当前微机保护存在的问题，提出了自适应继电保护发展的近期和远期目标，介绍了新研制成功的自适应电流保护原理。该保护装置能自动适应电力系统运行方式的变化和故障状态，在线整定保护的定值，使其处于最佳状态。该装置已投入试运行，运行情况良好。

关键词　自适应继电保护　电流保护　电力系统自动化

0　引言

自适应继电保护是在本世纪 80 年代提出的一个较新的研究课题。自适应继电保护可以定义为能根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值的保护。这种新型保护的出现引起了人们的极大关注和兴趣[1,2]。

自适应继电保护的基本思想是使保护尽可能地适应电力系统的各种变化，进一步改善保护的性能。电力系统由为数众多的电源设备、送变电设备、线路和各种用户组成，其运行状态（其中包括用户负荷的变化、设备的投切、发电机的出力变化等）处于频繁的变化之中，除上述正常运行情况外，电力系统中还可能发生各种类型的故障，故障可能是瞬时性或永久性的，又可能是金属性短路或经过渡电阻短路，因此要适应电力系统的变化，的确是一项十分困难的工作。

事实上，传统的继电保护也力图适应系统运行方式的变化和故障状态，例如电流速断保护的整定值，按系统最大运行方式下，线路末端发生三相短路考虑，过电流保护按线路的最大负荷考虑。这种按最严重的条件确定保护定值的方法，能保证所有可能的正常和故障条件下，保护都不会错误地切除被保护的线路，但却存在以下两个缺点：一是按该方法设定的定值，在其它运行方式（其中包括系统的主要运行方式）下不是最佳的；另外在最小运行或最不利的短路条件下，保护可能失效或性能严重变差。同时应该指出的是，在传统保护中也有许多自适应性能，例如过电流保护的反时限特性、差动保护中的制动特性，在距离保护中考虑了转换性故障以及防止系统振荡误动的方法等。由此可见，自适应保护并不是一个新提出的概念，它早已存在于传统继电保护之中。目前计算机在电力系统保护和控制中的应用以及相关技术的发展，更为自适应继电保护的发展，提供了前所未有的良机。

电力系统继电保护实质上属于电力系统自动控制的范畴，它的主要作用是切除发生故障的设备以保证电力系统的正常运行，同时也包括自动重合闸。当我们考虑自适应保护时，就必须进一步考虑电力系统运行状态和故障过程的变化。从这一观点看来，自适应保护实质上是一个具有反馈的控制系统。在自适应继电保护中，系统运行状态和故障过程变化的信息，可以就地获得或利用各种通信方式从相邻变电站或调度得到。电网调度自动化和变电站综合自动化以及微机的智能作用为获得更多的有用信息并加以实时处理提供了有利条件。就地获取信息简单易行，应首先予以考虑。利用通信由远端获取信息比较复杂，对快速传送数据信息的要求也较高，但如能显著改进保护性能，且通道能满足要求，用这种方式实现自适应保护也是合理的。

本文介绍了新研制成功的自适应电流保护的原理，在讨论自适应继电保护的作用、意义和分析发展条件的基础上阐明了其发展的趋势。

1　自适应继电保护的作用和意义

众所周知，继电保护的作用是在电力系统中电气元件发生故障时将故障元件从电力系统中切除，使故障元件免于遭受更大破坏，并保证电力系统尽快恢复正常运行。数十年来，继电保护技术总是在适应电力生产的需求和应用相邻学科中的新理论、新技术、新器件的条件下不断取得进步和发展，基本上满足了电力系统提出的要求，目前已迈入了计算机

1997－05－18 收稿。

保护的新时代。

10余年来,微机保护得到了飞速发展,它所具有的一系列优点使继电保护装置在性能上、可靠性和方便性上都远远超过了传统保护,受到了用户的欢迎和信赖,与半导体集成电路式的保护装置相比,微机保护的优越性已无可置疑了。

尽管目前微机保护已取得如此迅猛的发展,大有全面取代传统保护的趋势,然而仍应冷静地看到,在微机保护装置中,计算机潜在的智能作用还有待进一步发挥。虽然计算机保护具有高速运算和逻辑判断能力、强大的记忆能力以及其固有的可编程特点,可是如何更充分地在继电保护技术中发挥其智能作用,仍然是当前一个有待深入研究的重要领域,而自适应继电保护是其中一个充满希望的研究方向。

如上所述,随着计算机保护的发展,自适应保护的研究已开展多年,取得了令人注目的丰硕成果,但是仍处在初级阶段,用于实际生产的自适应保护装置更是寥若晨星,因此,大力开展自适应继电保护的研究有着重要的理论和现实意义。

为什么要研究和开发自适应继电保护?这是一个首先应该明确的问题。在这个问题上,目前仍然存在一些不同的看法。例如有人认为继电保护本身就是自适应的;还有人认为,现在的继电保护装置,尤其是微机保护装置已经基本上能满足实用要求,没有必要再提出或进一步研究自适应继电保护。不难看出,上述观点是不正确的。

应该说明,研究自适应继电保护的首要任务是解决现有的继电保护中存在的问题,而其最终目标则是使继电保护更趋于完美。从1984年原华北电力学院推出第一套微机距离保护装置以来,国内各高校、科研、生产单位已陆续研制和生产出适用于线路和元件的各种微机保护装置,它们已完全有能力取代传统的模拟式保护装置,从而使我国的微机保护进入当前国际先进行列,但不应忽视目前微机保护存在的问题。不少微机保护装置的原理和性能基本上与传统保护一样,只是传统保护的翻板,传统保护中已经存在的问题,在微机保护中依然存在,并未得到改进或解决。所以出现这种情况,其原因之一是对微机的智能作用认识不足或没有找到有效的方法进一步发挥其智能作用;其次是受长期形成的模拟式保护思维方式的束缚。为了使我国的微机保护进一步提高智能化的水平,取得突破性的进展,自适应保护是一条正确有效的途径。

2 自适应继电保护发展的条件

现在让我们来分析一下自适应继电保护发展的可能性。

2.1 微机式继电保护技术的进步

微机保护技术的进步是自适应继电保护发展的基础,脱离计算机的应用,自适应继电保护也不过是一纸空文。为了适应电力系统运行情况和故障条件的变化,自适应保护有必要获得更多的信息,并对它们进行分析处理,这就要求微机保护的硬件具有更快的运算速度和更强的记忆能力。近年来,国内微机保护硬件系统还在不断更新和改进,自适应继电保护研究工作的进一步深入,必将对微机保护硬件系统提出新的要求,一个满足自适应继电保护要求的硬件系统是其发展的必要条件。

长期以来,计算机保护的大量研究成果以及与计算机保护技术密切相关的其它科技领域中的新技术和新概念,例如自适应控制理论、神经网络和模糊控制以及小波变换理论和全球定位系统(GPS)的应用,都将促进自适应继电保护进一步发展。

2.2 电网调度自动化技术的发展

电网调度自动化技术在60年代开始由模拟式转向数字式,这种转变有着划时代的意义。在70年代中期由SCADA、AGC和网络分析汇集成为能量管理系统(EMS),80年代中期又借鉴EMS技术,由SCADA、网络分析和负荷控制汇集成配电管理系统(DMS)。自适应继电保护完全有可能依此途径进一步发展。

近年来,为适应电力工业的发展和电网运行的需要,在“八五”期间我国已卓有成效地建设发展了电力专用通信网和电网调度自动化系统[3]。特别值得提出的是电网调度自动化系统在实用化上取得了重大进展,现在我国90%以上的电网运行实时信息得到有效和准确的采集,厂站基础自动化设备可靠性和管理水平大大提高,其提供的准确而有效的实时信息已成为调度员进行电网安全、优质、经济调度的主要依据,对电网调度运行管理起到不可替代的作用,同时也为自适应继电保护提供所需的信息创造了条件。

2.3 电力系统自动化技术发展的需要

继电保护技术是电力系统自动化技术的一个分支,随着电力系统自动化中电网调度自动化系统的建设和实用化,采用变电站综合自动化技术和实现无人值班运行方式[4]如雨后春笋般地发展起来。这种现实一方面对继电保护技术的发展是一种新的机遇,另一方面也是一种挑战。继电保护是一门综合性

的学科，回顾继电保护技术的发展史，电力系统通信技术的重大进展和新的电子器件的出现都会引起继电保护装置的革命。自适应继电保护有能力迎接这一新的挑战，并且还将使继电保护技术提高到一个更高的水平。

3 自适应电流保护

3.1 电流速断保护

3.1.1 传统电流速断保护的问题

电流速断是一种有效的辅助性保护，由于它不带时限动作，因此从保护选择性出发，电流速断的定值应按躲开最大运行方式时，下一条线路出口三相短路时流过保护的电流 I_{Fmax} 整定，表示为：

$$I_{DZ} = k_k I_{Fmax} = \frac{k_k E}{Z_{smin} + Z_L} \tag{1}$$

式中 I_{DZ} 为电流速断的整定值；E 为系统等效电源的相电势；Z_{smin} 为保护装设处到系统等效电源之间的最小阻抗；Z_L 为被保护线路的阻抗；k_k 为可靠系数，$k_k = 1.2 \sim 1.3$。

实际上，短路电流的大小与系统运行方式、短路类型和短路点在线路上的位置有关。设在线路上 αZ_L 处短路，则短路电流为：

$$I_F = \frac{k_d E}{Z_s + \alpha Z_L} \tag{2}$$

式中 Z_s 为保护装设处到系统等效电源之间的实际阻抗；k_d 为故障类型系数。

令式(1)和式(2)相等，即可求出在实际运行方式下电流速断的保护范围 α：

$$\alpha = \frac{k_d(Z_{smin} + Z_L) - k_k Z_s}{k_k Z_L} \tag{3}$$

由式(3)可见，由于 $k_k > 1$，$k_d \leqslant 1$，$Z_s > Z_{smin}$，因此实际的保护范围 α 总小于最大运行方式下的保护范围，且保护范围将随 k_d 变小和 Z_s 增大而缩短。由此可得出保护范围等于零的条件为：

$$Z_s = \frac{k_d}{k_k}(Z_{smin} + Z_L) \tag{4}$$

3.1.2 自适应电流速断保护[2]

3.1.2.1 基本原理

为克服传统电流速断的缺点，自适应电流速断保护的定值应随系统运行方式和短路类型的实际情况而改变，其电流整定值可表示为：

$$I_{DZ}' = \frac{k_d k_k E}{Z_s + Z_L} \tag{5}$$

要使电流速断的定值按式(5)整定，必须实时测定故障类型系数 k_d 和保护装设处到系统等效电源之间的阻抗 Z_s。在此基础上，令式(5)与式(2)相等，可以得出自适应电流速断的保护范围 α'：

$$\alpha' = \frac{Z_L - (k_k - 1)Z_s}{k_k Z_L} \tag{6}$$

式(6)表明，α' 也不是常数，它随着实际系统的 Z_s 的变化而变化，但总是根据电流速断动作原理的基本要求而处于最佳状态。系统阻抗 Z_s 可由故障分量 $\dot{U}_{mg}$ 和 $\dot{I}_{mg}$ 求出。

自适应电流速断的保护范围等于零的条件可表示为：

$$Z_s = \frac{Z_L}{k_k - 1} \tag{7}$$

3.1.2.2 保护范围

将式(3)与式(6)进行比较可得：

$$\alpha' = \frac{(Z_L + Z_s - k_k Z_s)\alpha}{k_d(Z_L + Z_{smin}) - k_k Z_s} \tag{8}$$

由于

$$k_d(Z_L + Z_{smin}) \leqslant Z_L + Z_s \tag{9}$$

所以有

$$\alpha' \geqslant \alpha$$

为了说明自适应电流速断的效果，根据式(3)和式(6)求出的传统式和自适应电流速断的保护范围列入表1内。

表1 电流速断的保护范围比较

Table 1 Comparison of the protected zones of fast-tripping current protections

D/km	$\alpha_{max} = \alpha_{max}'$	三相短路		两相短路	
		α	α'	α	α'
50	0.627	<0	0.419	<0	0.419
100	0.73	0.108	0.626	<0	0.626

注：$Z_{smin} = 0.187$，$Z_s = 0.375$，$Z_L = 0.003\ 2$/km

由表1可见，与传统电流速断相比，自适应电流速断保护的性能得到显著提高。

3.2 自适应过电流保护

3.2.1 传统过电流保护的问题

过电流保护是根据在电网发生故障时短路电流增大的原理动作的。为了保证在非故障情况下保护可靠不动，传统过电流保护可按下式整定：

$$I_{DZ} = \frac{k_k k_{zg}}{k_h} I_{Hmax} \tag{10}$$

式中 I_{DZ} 为电流元件的启动电流；k_k 为可靠系数，$k_k = 1.15 \sim 1.25$；k_{zg} 为自启动系数，$k_{zg} > 1$；k_h 为电流元件的返回系数，$k_h \geqslant 0.85$；I_{Hmax} 为最大负荷电流。

过电流保护是否有效决定于其灵敏度 k_{Lm}，

$$k_{Lm} = \frac{I_{Fmin}}{I_{DZ}} \tag{11}$$

式中 I_{Fmin} 为最小运行方式下，保护区末端发生金属性两相短路的短路电流。

当灵敏系数 $k_{Lm} \geqslant 1.3$ 时，可以采用过电流保

护。由式(11) 可见，在 I_{Fmin} 固定的条件下，I_{DZ} 的大小，决定了灵敏系数能否满足要求。

由式(10)可见，传统过流保护的启动电流是按最大负荷电流的条件决定的，而大多数情况下，线路的负荷都在小于最大负荷条件下运行。此外，启动电流受返回系数和自启动系数的制约，也使保护灵敏度显著下降。这就使传统过电流保护的应用受到了不应有的限制。

3.2.2 对自适应过电流保护的要求

目前的电力系统中采用的过电流保护也具有某些自适应功能，例如过电流的反时限特性等，但这种自适应功能只有在预先设计好的人工干预条件下才能实现。在自适应过电流保护中则是对每条线路的电流进行实时监视，自动改变继电器的整定值和特性，从而达到使过电流保护更加灵敏可靠的目的。

在自适应电流保护作为变电站综合自动化的一个组成部分的条件下，还可将它和系统中央计算机联系起来，以实现其它方面的功能，例如诊断报警、监视、控制和配电系统恢复供电等。

3.2.3 自适应过电流保护的基本原理

自适应过电流保护的主要特征是过电流保护的定值和特性能够实时自动调整或改变，以适应负荷和运行方式变化的要求。下面以反时限过电流保护为例说明自适应过电流保护的基本原理。

设最大负荷电流为 I_{Hmax}，过电流保护的启动电流整定值可表示为：

$$I_{DZ} = k\, I_{Hmax} \tag{12}$$

式中 k 为系数，通常取 $k > 1.5$。

根据式(12)，可选用保护装置对应的一条反时限特性，表示为：

$$t = f(I) \tag{13}$$

当线路故障时，在短路电流小于 I_{Hmax} 的情况下，按上述特性动作的过电流保护将不能检出故障，但是通过对负荷电流的实时监视，便可根据实际负荷电流 I_H 自动改变为动作更灵敏的另一条反时限特性，表示为：

$$t = \Psi(I) \tag{14}$$

当保护装置的时间-电流特性由式(13)改变为式(14)后，过电流保护装置将有可能更灵敏并且更快地切除故障。

自适应电流保护装置已由西安交通大学与南京电力自动化设备厂共同研制成功，并已投入试运行。

4 自适应继电保护的发展趋势

从上面的实例中可以看出，自适应继电保护能克服同类型传统保护长期以来存在的困难和问题。目前，自适应继电保护还处在研究开发的初期，现在的研究成果已经有力地说明了它的优越性。下面提出自适应继电保护发展的几个方面供同行参考。

4.1 保护性能最佳化

保护性能最佳化是在考察现有保护(包括微机保护)存在问题的基础上提出的。对电力系统继电保护的 4 个基本要求是选择性、速动性、灵敏性、可靠性，它们之间既矛盾又统一，问题在于如何根据实际情况正确处理这 4 个基本要求之间的辩证统一关系。例如，传统的观点是必须在最不利的条件下考虑选择性和灵敏性，从而最大限度地满足了选择性和灵敏性的要求，其效果虽不是最佳的，但却是正确合理的，因为这种思维方式和决策方法与传统继电保护装置的情况相适应，或者说是由传统的保护装置不能在线自动识别千变万化的一次系统的运行状态和故障状态所决定的。与传统保护不同，自适应保护的突出特点之一就是具有自动识别系统运行状态和故障状态的能力，并针对状态的改变，实时自动地调整保护的性能，其中包括动作原理、动作特性和整定值，从而使其达到最佳效果。

4.2 整定计算在线化

继电保护装置整定计算的目的是，对电力系统中已经配置安装好的各种保护装置，按照具体电力系统的有关参数和运行要求，通过计算分析给出所需要的各项整定值，以使全系统中的保护装置正确协调地工作，有效地发挥其作用。由于电力系统的结构变化和运行情况的复杂性，继电保护的整定计算是一项复杂而又艰巨的工作，目前已开始进入计算机辅助整定计算的阶段，尽管还存在着不足，但整定计算工作效率已显著提高了。迄今，所有的整定计算都是离线进行的。

自适应继电保护技术的发展预示出未来整定计算在线化的可能性，本文所给出的自适应电流保护就具有在线整定计算的能力。当然，电力系统整定计算在线化的任务要远比这种最简单的电流保护的整定计算复杂得多，但是随着自适应继电保护技术的进步，特别是电力系统继电保护信息网的形成和发展，可以预见整定计算在线化的时期一定会到来。

4.3 使用简便化

微机保护之所以能在短短的 10 余年间取得如此迅猛的发展，是因为它有着传统的模拟式保护不可比拟的优点，微机保护装置现场调试、维护简便化深受用户的欢迎。自适应继电保护将进一步发展计算机的智能作用，使装置使用更加简便化。

（上接第 30 页）

荷分配和电厂及流域的综合运行管理，提高电厂或流域的综合运行管理水平。

（3）火电厂控制过程比较复杂，电网 AGC 运行初期，利用火电厂机组调功装置进行 AGC 遥调发挥了重要作用。首先，使电网 AGC 遥调火电厂机组在保证机组安全运行的前提下实现遥调运行；其次，在遥调运行中所反映出负荷变化时参数波动较大等问题，只有提高热工自动化水平才能使遥调质量得以保证。这在很大程度上促进了有遥调机组的电厂进行设备技术改造，提高热工投入率。上述控制方式由于机组可控性差，电网 AGC 遥调水平也不高，但综合分析，对机组安全、优质、经济运行还是发挥了一定的作用。

（4）火电单机直控方式存在的最大问题是电网 AGC 无法全面考虑到机组各种约束条件和较为复杂的工况，特别是无法考虑同一厂内机组间的优化调整。为此，近年来正在进行研究火电厂分布控制系统，把电厂的优化调整作为研究对象，厂内机组间的优化调整及安全约束均由电厂分布式控制系统独立完成，从而实现分层控制、分级分层管理、分级分层考核，提高电网 AGC 整体功能。

（5）对新建和扩建的大机组，按部颁的《火力发电厂基本建设工程启动及竣工验收规程》做到机、炉协调功能与主机同步建设、同步验收、同步投产，使大机组基础自动化水平有所提高，为实现电网 AGC 遥调火电机组创造了条件。电网 AGC 应充分利用电厂基础自动化改造成果，实现通过 CCS 功能遥调火电机组。由于 CCS 功能齐全，可保证机组在安全约束条件下，机组优化运行，完全可以满足电网 AGC 运行可控性要求。

潘明惠，男，1955 年生，高级工程师，博士研究生，东北电网调度通信中心副总工程师，从事电力系统调度运行管理与 EMS 高级应用软件研究工作。

黄其励，男，1941 年生，教授级高级工程师，博士，东北电业管理局总工程师，从事电网管理与工程应用研究工作。

李志民，男，1963 年生，博士，副教授，从事电力系统及自动化教学与研究工作。

STUDY ON THE AGC PROCESS CONTROL OF POWER PLANTS

Pan Minghui, Huang Qili (Northeast China Electric Power Administration, 110006, Shenyang, China)
Li Zhimin, Chen Xueyun (Harbin Institute of Technology, 150001, Harbin, China)

Abstract In this paper the AGC process control methods of power plants which are being used and will be used in Northeast power system are analysed. Some methods for achieving power plants AGC process control based upon the conditions of our country are proposed.

Keywords power plants AGC process control