

智能电网调度控制系统 AGC 需求分析及关键技术

滕贤亮¹, 高宗和¹, 朱 斌², 吴继平¹, 彭 栋², 徐 瑞¹, 张小白¹

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024)

摘要: 对智能电网调度控制系统中自动发电控制(AGC)面临的新业务需求及关键技术进行了分析和展望。剖析了 AGC 控制模式、性能评价标准和控制策略的内涵, 论述了其在特高压建设、一体化调度模式和新能源接入背景驱动下的变化; 对智能调度 AGC 领域已开展的技术实践进行了总结和思考, 提出了适应新变化的控制架构和关键技术; 最后, 探讨了 AGC 为满足未来华北、华中、华东(简称“三华”)同步电网控制需解决的若干技术问题。

关键词: 自动发电控制; 智能调度; 控制性能标准; 新能源控制; 安全约束; 调度控制系统

0 引言

作为现代化电网运行控制的基本技术, 自动发电控制(AGC)已成为电网调度运行必备的手段之一^[1]。与互联电网的发展相适应, AGC 经历了从分散式频率自动控制装置(AFC)到基于能量管理系统(EMS)的自动控制系统的过程, 并逐步制定了相关技术评价标准用于引导控制区运行。中国自 20 世纪 80 年代末期从国外引进 AGC 以来, 经过多年的探索和实践, 已在该领域取得了快速发展, 显著提升了电网的频率质量, 为电网的安全经济运行发挥了重要作用。

随着特高压电网、交直流输电技术和新能源的快速发展, 国内电网结构和形态发生了新的变化, 物理上各区域电网连为一体, 由长链式弱连接向团式强连接转化, 运行特性呈现出一体化趋势^[2], 增加了电网调度和控制的复杂程度, 对电网安全经济运行的调度业务支撑提出了新的要求^[3]。因此, 迫切需要增强互联电网频率、联络线功率的控制手段, 提高电网智能一体化协调控制的能力。

作为智能电网调度控制系统的核心应用, AGC 面临着新的挑战, 主要表现在: ①需适应不断发展的交直流混联电网的复杂运行方式, 现有区域电网和省级电网 AGC 遵循的评价标准、控制策略需要随之变化; ②要适应新能源的规模化发展, 面向常规机组的控制模式和分省平衡控制方式难以满足新能源接入后实时调度控制的需要; ③要能充分保证大电

网的运行安全, 除了要实现电网正常运行状态下的区域功率平衡、特高压潮流和重要输电断面安全控制以外^[4], 还应能在电网发生扰动时通过多级调度的协同措施, 实现频率的快速恢复, 并尽量减少该过程中的联络线潮流波动。

本文在分析基于智能电网调度控制系统的 AGC 新需求的基础上, 结合近年来在该应用领域开展的技术实践, 提出了智能调度 AGC 多目标协调控制的应用架构, 总结了适应特高压电网一体化调度和新能源接入需求的 AGC 关键技术, 并对适应未来华北、华中、华东(简称“三华”)电网控制的 AGC 发展趋势进行了展望。

1 AGC 应用需求

1.1 AGC 控制模式、标准与策略关系分析

不同于国外普遍采用的单一控制区性能评价标准(以下简称“评价标准”)和控制技术支撑体系^[5], 中国的频率和联络线功率控制问题已演变为多层级控制主体、多重控制目标和多套评价标准相交织的复杂控制问题。

对于互联电力系统控制而言, AGC 控制模式、评价标准、控制策略是 3 个独立又相互影响的重要环节, 三者之间的关系如图 1 所示。



图 1 控制模式、评价标准和策略之间的关系
Fig.1 Relationship among control mode, performance standard and control strategy

收稿日期: 2014-10-08; 修回日期: 2014-11-17。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A118)。

1)控制模式。根据互联电网的形态和管理需求制定,其实质决定了电网控制区和控制主体^[6](或“平衡主体”)之间的配合关系,单一层级的电网控制模式侧重多个区域互联时各自的控制责任,如定频率控制(FFC)、频率偏差控制(TBC)等模式;对于现阶段“三华”电网来说,控制模式重点在于理清国、分、省三级调度之间的控制目标和协调机制。控制模式是制定评价标准、研究控制策略的基础,其重要特征之一是会随着电网结构和管理体制的变化而发生改变,这也正是新形势下 AGC 控制需求变化的内在动因。

2)评价标准。用于引导各控制区规范、安全、经济控制的重要准则,其与控制模式的关系如同政策标准与国家政体的关系,是引导控制策略执行的“指挥棒”,也是控制模式得到运用的主要载体。由于各级主体控制的目标不同,国内存在多套并行的评价标准,如 A 标准、C 标准和 T 标准等,有着各自的适用性。对于某一类特定的控制目标(如频率),评价标准具有抽象性,与电网结构、电压等级和区域调节资源的构成关系较小。

3)控制策略。控制策略是评价标准的执行和实现,是调度运行机构为适应控制模式和评价标准的要求采取的具体措施与手段,由控制区自行制定。以适应控制性能标准的 AGC 控制策略为例,其既可以由集中控制模式下的控制区域运营者操作,也可以由分散式控制模式下的被授权机组和其他市场参与方进行操作。由于对评价标准的解读不同,标准在执行时既可以作为控制的约束条件,也能作为优化目标,因而实际运行中所采用的控制策略不一。

1.2 智能电网调度控制系统中 AGC 的需求驱动

中国互联电网已从区域电网发展成为广泛互联、高度智能的特高压互联电网,AGC 控制模式、评价标准和控制策略正面临着重大改变,需要适应电网电气联系增强、团状结构和运行一体化等特性,逐步解决大范围协调、多级调度配合、多类控制措施协调的关键问题,面临新的技术诉求。

1.2.1 支撑一体化调度模式

随着大区互联程度的增强,AGC 的协调层级和协调广度相比以往更大。传统的电网控制主要考虑区域电网和内部省级电网的协调,较少涉及区域电网之间的协调,上下级主体间的配合方式主要为对等、主子、单一几种方式。特高压电网涉及国、分、省三级调度多个控制区,不同调度层级间的配合方式更加复杂。

由于各国电网管理运行模式的差异性和电力市场化程度不同,互联电网 AGC 控制模式在有功控

制目标、资源获取方式和资源调用方式等方面存在着较大差异^[7]。综合来看呈现以下发展趋势:为了降低控制资源需求,由分子区域平衡向区域统一平衡过渡;为了提高经济性,由分子区域获取资源向区域统一获取资源过渡;为了加快频率恢复速度和加强统一管理,由分子区域调用、区域分级调用向区域直接调用过渡。文献[8]对不同范围电力系统对 AGC 的调节需求进行了分析比较,指出较大范围内统一使用 AGC 调节容量比较小范围内经济得多。

特高压互联电网形成后,电网特性将由区域模式转向总体模式,集中调用资源和控制可使 AGC 资源得到最优配置,运行费用降低,联网经济效益得以充分体现。需要指出的是,控制模式与电网管理模式不同,目前“统一调度、分级管理”的管理模式虽不会改变,但控制模式可根据电网的发展和调控支撑技术的日趋成熟不断变化。

随着智能调度技术的快速发展,以及信息化和自动化程度的不断提高,面向未来互联电网的智能电网调度控制系统已具备业务层面的“集中式”控制,调控中心具备快速获取全网信息,全局统筹分析、预警和决策的能力。一体化调控模式下,调控中心可根据全网的调节资源分布情况,将调节量直接下发至网内所有 AGC 机组(或经由内部的下级调度机构转发或分解),出力分配过程中优先调用品质优良的调节资源,在电网发生大扰动时考虑输电断面的安全约束^[3],进行快速、有效的全局性支援。

1.2.2 适应特高压电网控制

中国电网目前所广泛采用的 A 标准、C 标准等性能评价标准,主要以北美电力可靠性协会(NERC)制定的 CPC(control performance criteria)和 CPS(control performance standard)^[9]为参照系,考虑到电网结构和管理体制的实际情况与国外的差异,在引入时进行了一定程度的改进^[10]。多年实际运行结果证明了其对提升电网频率品质、建立良好的频率控制秩序起到了重要作用。

华北、华中电网经晋东南—南阳—荆门特高压交流联络线联网后,为强化对联络线功率的控制,有效抑制其波动,国家电力调度控制中心制定了以责任度为核心的 T 标准^[11],与 C 标准构成了对偶的一组标准。

图 2 所示为统计的 2012 全年华北—华中互联系统的频率和特高压联络线功率偏差分布。可以发现其满足数学期望近似为 0 的正态分布(图中联络线功率偏差的期望存在一定偏移,原因主要是由华北、华中电网采用不同的评价标准导致)。

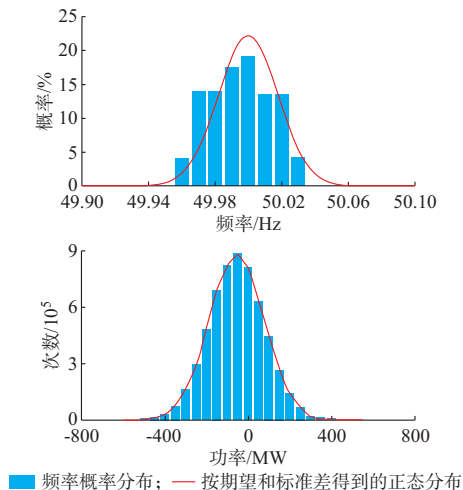


图 2 频率和联络线功率偏差概率密度分布
Fig.2 Probability distribution of frequency and tie-line power variation

实际上,C 标准和 T 标准的制定原则正是基于这种长期统计学特性,评价目标虽然不同,但核心数学原理基础一致。评价标准实质上反映的是控制区自身区域控制偏差(ACE)与全网控制目标的相关性(由 I 类标准规范),鼓励区域间的相互支援,重在区分控制区的责任和贡献大小,同时还起到限制各平衡区非计划功率流动的作用(由 II 类标准规范)。

随着特高压区内、跨区交直流线路的不断建设,目前采用的一些评价标准,如 A 标准、T 标准逐渐不再适用,需要研究适应新的网架结构和控制目标的评价标准和策略。多回交直流线路强联系方式下,电力系统运行的不确定性增加。例如直流闭锁、交流电网严重故障等造成的大功率缺失时,为了保证系统连续供电的能力,应当配置足够的备用容量;同时,为了保证电网的稳定运行,区域协调控制需覆盖更大的范围,上升到更高的电网层级来考虑。

1.2.3 适应新能源的接入

近年来,国内风能和太阳能发电发展迅速,根据国家新能源产业发展规划,预计到 2020 年风电、光伏总装机容量将分别达到 150 GW 和 100 GW。新能源发电的大规模接入,给电力系统的各个领域都带来了挑战,有功调度控制领域也不例外。为此,需要结合新能源发电的特点,对传统的 AGC 控制策略和相关的 evaluation 标准进行改进。

一方面,需要尽可能地综合利用传统发电方式与风力发电方式,通过制定出合理可行的调度控制方案来消纳风电的影响。随着新能源接入规模的扩大,除了要实现区域内部的协调控制,还需要站在整个区域互联电网的角度,集中全局的可调节资源来实现新能源的跨区大范围消纳^[12]。

另一方面,需要建立与广域协调控制相适应的联络线功率(电量)评价标准。新能源接入后,平衡区内的功率波动将更加明显,分钟级以内的频率控制问题更加突出。针对 CPS 存在的对控制区短时性能评价缺失的问题,NERC 近年提出了 BAAL (balancing authority ACE limit) 标准,规定在特定的连续时间(不少于 30 min)内,控制区 ACE 的单位分钟均值的限值应根据实时频率偏差计算得出。该标准用于替代现有的 CPS2 标准,并对 CPS1 的缺陷更好地进行了补充^[13-14],值得今后的标准研究和制定工作借鉴。

综上所述,新的业务需求亟待研发新的 AGC 架构及应用功能,以提升全网统一控制决策的能力,在实现电网安全、经济控制的同时,满足大范围资源优化配置和最大限度接纳可再生能源等需求。

2 AGC 模型及架构

2.1 AGC 控制模型

近年来,AGC 已从单一区域控制过渡到多区域控制模型,传统的多区域控制模型在固定后很少改变,区域的划分方式和 AGC 机组隶属关系是静态的,需要离线维护。新的调控业务需求下,控制区域 ACE 的内涵更加丰富,通过改变 ACE 的表达式可以起到改变承担的控制责任、附加的调节任务甚至控制区边界等作用;当区域调节资源无法满足备用需求时,应可以灵活地进行在线调整和转移。为满足上述需求,在智能电网调度控制系统设计之初,提出了支持多区域、多层次 AGC 协调的动态建模方法。

1)控制区域既可以对应实际的控制区,也可以对应虚拟的控制区。“实控制区”同时支持建立不同层次的控制区域模型,除了可以建立本区域和外网的联络线模型外,还支持外网模型、下一级区域电网模型等;“虚控制区”可以仅为某类特定控制问题服务,如一段时期内抽调机组构成的特高压控制区、某个断面潮流控制区,甚至新能源控制区等,这些虚拟的控制区不像常规控制区那样必须具备频率、联络线量测。

2)控制目标灵活可定制。“实控制区”除可采用本区域计算的 ACE 外,还支持上级或同级调度机构转发的 ACE 来调节机组出力;对“虚控制区”而言,控制目标是对传统 ACE 的拓展,可由运行人员根据实际需要自行组织,如新能源外送控制目标、扰动后频率紧急恢复时的附加调整功率等。在实现上,支持用户使用智能电网调度控制系统基础平台自定义量测或公式编辑,也可以由其他调度机构、应

用模块通过消息转发接入。

3)可在线指定任一个或一组控制对象参与某个区域(目标)的调整,这得益于 AGC 模型内部采用了控制对象和区域的动态指针映射机制。为实现这一功能,还根据调节资源的特性,对调节设备进行了一体化建模处理,可控对象除常规水火电机组外,还可以是风机、光伏逆变器等新能源设备,甚至是直流控制器。

2.2 AGC 应用架构

智能电网调度控制系统中 AGC 应用架构如图 3 所示。在决策层,实现多个维度的协调控制:空间维度,通过在国、分、省三级调度的部署,实现各级调度控制目标的协调互动;时间维度,实现日前、实时计划机组和 AGC 机组在不同时间尺度的衔接控制;目标维度,除了满足功率平衡控制目标外,还通过和网络分析应用的闭环实现对电网潮流的安全控制。在执行层,基于决策层给出的控制目标,通过对常规发电和新能源发电资源的优化分配调用,经安全防误处理后形成控制指令。

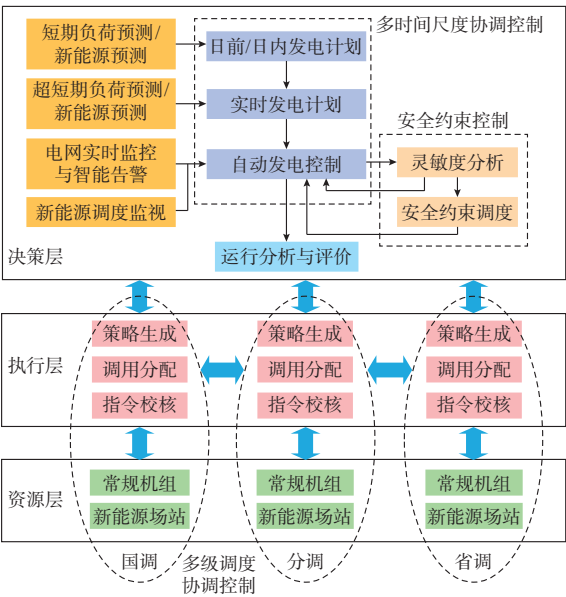


图 3 智能电网调度控制系统中 AGC 应用架构
Fig.3 Architecture of AGC based on smart grid dispatching and control system

3 AGC 关键技术

3.1 多级调度标准和策略的协调

对各级调度采用的不同评价标准均给予支持,并提供与之相适应的控制策略^[15-16],根据评价目标的调整(如从 A 标准调整为 C 标准)在线实施切换。特别是为满足特高压互联电网多层次控制需要,支持多级主体控制策略的协调,目前已在下列场景得

到实际应用:①为满足跨区特高压联络线功率控制的需,通过分、省调 ACE 的实时协同来兼顾 T 标准和 C 标准^[17];②为实现区域受端电网频率扰动后的快速恢复,通过分摊事故备用来实现对 ACE 的短时快速修正^[18]。

3.2 安全约束控制

传统的 AGC 与电力系统的网络结构无关,运行时不考虑电力系统的安全约束。对于安全稳定运行要求更高的特高压电网来说,在实时控制层面,除了要满足 AGC 常规控制目标外,还需要兼顾重要的线路、稳定断面的潮流控制,使其始终处于安全范围之内。

根据断面控制要求不同,AGC 安全约束控制支持多种实现方法:①对于省区内部的特定控制断面,如 500 kV 和 200 kV 电磁环网解环后形成的独立分区间的传输断面,由于其已与区域内机组形成相对封闭的割集,可采用多区域控制模型实施对断面功率的跟踪控制^[19],为实现断面在不超过稳定限值的情况下尽可能利用其传输能力,分区控制目标可在引入时预先进行处理;②对于多断面复杂控制,利用智能电网调度控制系统在基础平台、数据和分析决策等方面提供的支持,AGC 通过与网络分析应用的接口获取灵敏度分析、安全约束调度(SCD)的优化结果,闭环后可实现稳定断面越限的预防控制和校正控制^[20]。

3.3 与实时发电计划的闭环控制

实时发电计划建模和优化编制目前已取得较大进展^[21],但进入闭环控制环节还存在一些亟待解决的问题:一是实时计划优化结果在执行时,通常由调度人员根据经验来选择部分 AGC 机组承担,难以适应日益复杂多变的电网运行方式和新能源接入后的实时调控要求;二是实时计划周期较短且覆盖 AGC 控制周期,控制对象相互影响,若不能充分考虑 AGC 调节性能的要求,计划执行过程有可能增大 AGC 压力。

实际运行中发现,AGC 若不考虑实时计划对其调节趋势的指导作用,仅依据 ACE 事后反馈信息,一旦失去调节能力,控制效果和评价指标将会严重恶化。与日前计划的闭环控制有所不同^[22],实时发电计划闭环的核心是通过组织各类机组实现控制角色和调节容量的优化调控,以保持未来时段综合的最优调节能力,避免机组的频繁调整和爬坡资源的不合理分配。针对上述考虑,AGC 已实现参与实时调度机组控制模式的动态转换和调节容量转移,可根据不同工况下 AGC 容量需求的变化自适应进行调整:在负荷爬坡阶段增加固定基点模式机组,以实

现对负荷趋势变化的快速跟踪,平稳时段多采用浮动基点模式机组,以满足 ACE 调节和实时控制指标(如 C 标准)的要求;电网扰动情况下,根据缺失的功率大小和速率要求,释放更多的浮动基点备用容量,以快速恢复频率和平抑功率波动。

3.4 新能源接入控制

在适应风电、光伏接入后的有功调度控制策略方面,近年来国内外已经取得较多应用实践^[23]。基于智能电网调度控制系统基础平台和分区多目标控制模型,AGC 从架构和策略方面已实现对新能源控制的有效支撑,具体表现在以下方面。

1) 调度主站端控制

针对新能源发电对电网调峰、调频及外送通道断面安全的影响,结合其自身控制特性,提供了最大功率、限值功率、计划跟踪等不同的有功控制模式^[24],以满足风电(光伏)最大限度消纳、电网紧急控制、调峰控制等多种需求。上述模式和策略已在西北等 10 GW 级风电基地取得实际应用,采用 AGC 实时控制可以平稳控制断面潮流不超过限值,同时又最大限度地利用了风电输送通道容量。

2) 新能源场站端、接入地区控制

为适应抽水蓄能、化学储能系统,以及风、光电源联合运行控制的需要,建立了应用于新能源汇集地区场站端的分层控制框架和多源电源联合控制策略。以“国家风光储输示范工程”的实践为例^[25],基于智能电网调度控制系统基础平台的 AGC 应用支持可灵活组态、无缝切换的风光储联合控制模式和单场站控制模式,可协调储能系统实现多种控制目标(平滑风光、削峰填谷等),通过结合储能荷电状态(SOC)反馈实时优化风光储联合发电系统的运行状态,实现近似常规电源发电品质的功率输出。

3.5 控制安全防误

电网调度业务的集成化和控制技术的一体化趋势,对 AGC 安全防误提出了全新要求。纵向维度,需重点应对调度和厂站数据交互增多后,过程安全控制、指令传输链条和电厂执行环节等增加的不确定性风险,例如对关键中间变量滤波以消除高频分量和数据异动的影 响,完善水电机组振动区跨越逻辑^[26],及时校验电厂反馈结果实施自动干预等;横向维度,需关注 AGC 运行参数、模式操作不当等人为风险,对各类人工输入进行操作权限和合理性区间的动态校验,对模型维护、平台数据库及相关应用发生异常时进行有效隔离。以往 AGC 暂停或退出时,调度员往往需要花费大量时间来从结果反向分析原因,如能给出综合判定后的故障原因告警,并提供计算流程和安全策略的图形化动态展示界面,则

有助于运行人员快速处置故障和恢复运行。

在吸取以往 AGC 安全校验和闭锁措施的经验基础上,基于“交叉校验、层级闭锁”的原则,形成了由“全过程自动安全策略、操作安全防误、图形化分层告警”组成的安全防误体系^[27]。

3.6 辅助分析控制技术

利用智能电网调度控制系统基础平台对应用的支撑,为实现控制由经验型、分析型向智能型的转变,通过引入可视化、事故反演等技术手段,AGC 进一步增强了对未来运行趋势和历史控制行为的辅助分析。

可视化 AGC 包括:采用消息映射机制的多主题框架、数据动态着色、可视化图元及三维虚拟等技术^[28],实现区域、场站和机组(含新能源控制对象)运行信息、备用需求及评价指标等的全景展示;对上文所述的控制策略给予可视化支持,如附录 A 图 A1 所示,提供频率、联络线功率和 ACE 组成的动态运行平面,实时给出区域在执行 CPS、特高压功率控制策略时运行点所处的区间,记录历史运行轨迹,使调度员能直观感受到整体控制效果,并根据变化趋势作出相应调整;在触发安全约束控制策略时,基于地理潮流图,结合断面重载或越限程度、关联机组的灵敏度分析,展示 AGC 机组开始调节直至断面恢复的全过程动态(见附录 A 图 A2)。

电网结构和控制行为日趋复杂,当出现故障或运行指标不佳时,需要对历史控制行为进行回溯分析,在数据采集与监控(SCADA)反演功能的基础上,AGC 还通过对电网重要事件的辨识,实时记录 AGC 模型、数据和指令,结合图形可视化技术,实现了对电网故障和恢复过程的“全息”反演。

4 结语

特大电网地域分布广、网络结构复杂、运行状态多变,安全协调控制异常复杂,迫切需要通过联络线功率和系统频率的协调优化控制,提升电网运行的经济性和安全性。结合“三华”电网建设过程中的发展新趋势,提出下一步需要着重研究的内容和方向,以供参考。

1) 随着电力系统市场化进程的不断加快,需要在现有的 AGC 功能基础上进一步考虑机组辅助服务费用,研究适应统一电力市场环境的 AGC 控制策略和评价标准。

2) 在 AGC 控制策略方面,虽然近年来已陆续提出了自适应和变结构控制、鲁棒控制、智能控制和预测控制等算法^[29],但仍处于起步研究阶段,距离电网实际应用还有一定距离。因此,需继续深入研

究大系统多变量协调控制理论的数学模型和优化方法,为多区域优化协调控制提供理论支撑。

3)需重点研究“三华”特高压电网形成过程中,送、受端区域电网在控制中出现的新问题,如新能源直流外送近区的风火打捆控制、大受端电网区内特高压潮流和常规 AGC 的协调控制问题等。

4)与 AGC 控制的一些配套技术。例如:为促进各区域电网联络线及频率控制的精细化,区域频率偏差系数的获取和分配方法,一次、二次调频的协调控制技术还有待完善。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 周京阳,于尔铿.能量管理系统(EMS):第5讲 自动发电控制[J].电力系统自动化,1997,21(5):75-78.
ZHOU Jingyang, YU Erkeng. Energy management system (EMS): Part five automation generation control [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(5): 75-78.

[2] 姚建国,严胜,杨胜春,等.中国特色智能调度的实践与展望[J].电力系统自动化,2009,33(17):16-20.
YAO Jianguo, YAN Sheng, YANG Shengchun, et al. Practice and prospects of intelligent dispatch with Chinese characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 16-20.

[3] 姚建国,杨胜春,单茂华.面向未来互联电网的调度技术支持系统架构思考[J].电力系统自动化,2013,37(21):52-59.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, SHAN Maohua. Reflections on operation supporting system architecture for future interconnected power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 52-59.

[4] 高宗和,陈刚,杨军峰,等.特高压互联电网联络线功率控制:(一)AGC 控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(15):51-55.
GAO Zonghe, CHEN Gang, YANG Junfeng, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid: Part one AGC control strategies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 51-55.

[5] 汪德星.通用的联络线功率控制性能标准的研究[J].华东电力,2011,39(1):1-8.
WANG Dexing. Study on the power control performance standard for general tie lines [J]. East China Electric Power, 2011, 39(1): 1-8.

[6] 汪德星,胡朝阳.互联电网多层级联络线功率控制方式的探索[J].华东电力,2010,38(9):1327-1331.
WANG Dexing, HU Zhaoyang. Exploration on power control methods for multi-layer tie line of interconnected power grid [J]. East China Electric Power, 2010, 38(9): 1327-1331.

[7] 洪兰秀,杨莉,邱家驹,等.含自动发电控制信号时滞的区域互联电网 AGC 控制模式研究[J].华东电力,2006,34(3):23-27.
HONG Lanxiu, YANG Li, QIU Jiaju, et al. AGC structures for regional interconnected grids with AGC signal delays [J]. East China Electric Power, 2006, 34(3): 23-27.

[8] 汪德星.电力系统运行中 AGC 调节需求的分析[J].电力系统自动化,2004,28(8):6-9.
WANG Dexing. Demand analysis on AGC regulation in power system operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 6-9.

[9] JALEELI N, VANSLYCK L S. NERC's new control performance standards [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1096.

[10] 汪德星.华东电网实行 CPS 标准的探索[J].电力系统自动化,2000,24(8):41-44.
WANG Dexing. Study of CPS standards in East China power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(8): 41-44.

[11] 高宗和,陈刚,滕贤亮,等.特高压互联电网联络线功率控制:(二)AGC 性能评价[J].电力系统自动化,2009,33(16):61-64.
GAO Zonghe, CHEN Gang, TENG Xianliang, et al. Active power control for tie-lines in UHV interconnected power grid: Part two AGC performance assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 61-64.

[12] 高宗和,滕贤亮,张小白.适应大规模风电接入的互联电网有功调度与控制方案[J].电力系统自动化,2010,34(17):37-41.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Solution of active power dispatch and control scheme for interconnected power grids with large-scale wind power integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 37-41.

[13] Reliability standards for the bulk electric system of North America [R]. 2013.

[14] Maintaining bulk power system reliability while integrating variable energy resources—CAISO approach [R]. 2013.

[15] 高宗和,滕贤亮,张小白.互联电网 CPS 标准下的自动发电控制策略[J].电力系统自动化,2005,29(19):40-44.
GAO Zonghe, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai. Automatic generation control strategy under control performance standard for interconnected power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 40-44.

[16] 滕贤亮,高宗和,张小白,等.有功调度超前控制和在线水火电协调控制策略[J].电力系统自动化,2008,32(22):16-20.
TENG Xianliang, GAO Zonghe, ZHANG Xiaobai, et al. Look-ahead control for active power dispatching system and online hydro-thermal coordinated control strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 16-20.

[17] 刘振亚.特高压交流输电技术研究成果专辑 [M].北京:中国电力出版社,2011:313-322.

[18] 周毅,钱学东.华东电网动态区域控制误差应用分析[J].电力系统自动化,2010,34(8):106-110.
ZHOU Yi, QIAN Xuedong. Applications analysis of dynamic ACE in East China power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(8): 106-110.

[19] 张小白,孙素琴,滕贤亮,等.基于多区域的 AGC 多目标协调控制方法[J].电力系统自动化,2010,34(16):55-57.
ZHANG Xiaobai, SUN Suqin, TENG Xianliang, et al. A multi-area based AGC multi-objective coordinated control method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 55-57.

[20] 张小白,高宗和,钱玉妹,等.用 AGC 实现稳定断面越限的预防

- 和校正控制[J].电网技术,2005,29(19):55-59.
- ZHANG Xiaobai, GAO Zonghe, QIAN Yumei, et al. Implementation of preventive and remedial control for tie line overload by use of automatic generation control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 55-59.
- [21] 徐帆,陈之栩,张勇,等.实时发电计划模型及其应用[J].电力系统自动化,2014,38(6):117-122.
- XU Fan, CHEN Zhixu, ZHANG Yong, et al. Real-time generation scheduling model and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 117-122.
- [22] 吴继平,滕贤亮,张小白,等.日前发电计划多尺度逼近的 AGC 控制方法[C]//中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会 2012 年学术交流会论文集,2012 年 11 月 29 日,厦门,中国: 5p.
- [23] ACKERMANN T, ABBAD J R, DUDURYCH I M, et al. European balancing act[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(6): 90-103.
- [24] 徐瑞,滕贤亮,张小白,等.大规模光伏有功综合控制系统设计[J].电力系统自动化,2013,37(13):24-29.
- XU Rui, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai, et al. Design of integrated active power control system for large-scale photovoltaic system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 24-29.
- [25] 任洛卿,白泽洋,于昌海,等.风光储联合发电系统有功控制策略研究及工程应用[J].电力系统自动化,2014,38(7):105-111.
- REN Luoqing, BAI Zeyang, YU Changhai, et al. Research on active power control strategy for wind/photovoltaic/energy storage hybrid power system and its engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 105-111.
- [26] 袁飞,滕贤亮,张小白,等.调度主站 AGC 中水电机组振动区的动态建模与跨越方法[J].电力系统自动化,2011,35(1):87-90.
- YUAN Fei, TENG Xianliang, ZHANG Xiaobai, et al. Dynamic modeling and striding methods of vibration zone for hydro-electric units in electric dispatch main station AGC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 87-90.
- [27] 汪皓,赵旋宇.调度控制中心侧自动发电控制安全防误体系及安全策略分析[J].广东电力,2012,25(10):74-80.
- WANG Hao, ZHAO Xuanyu. Safety and anti-misoperation system for automatic generation control beside dispatching control center and safety strategy analysis [J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(10): 74-80.
- [28] 沈国辉,李立新,狄方春,等.特高压电网调度自动化系统的数据集成和可视化展示[J].电力系统自动化,2009,33(23):94-97.
- SHEN Guohui, LI Lixin, DI Fangchun, et al. Data integration and visualization representation for the UHV power grid dispatching automation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 94-97.
- [29] 颜伟,赵瑞锋,赵霞,等.自动发电控制中控制策略的研究发展综述[J].继电器,2013,41(8):149-155.
- YAN Wei, ZHAO Ruifeng, ZHAO Xia, et al. Review on control strategies in automatic generation control[J]. Relay, 2013, 41(8): 149-155.

滕贤亮(1978—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电网调度自动化、新能源运行控制。E-mail: tengxianliang@sgepri.sgcc.com.cn

高宗和(1962—),男,硕士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化、新能源调度与控制。

朱 斌(1965—),男,高级工程师,主要研究方向:智能电网调度运行。

(编辑 章黎)

Requirements Analysis and Key Technologies for Automatic Generation Control for Smart Grid Dispatching and Control Systems

TENG Xianliang¹, GAO Zonghe¹, ZHU Bin², WU Jiping¹, PENG Dong², XU Rui¹, ZHANG Xiaobai¹

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: The new demand and key technologies faced by automatic generation control (AGC) are analyzed and envisioned for the smart grid dispatching and control systems. The implications of AGC control modes, performance standards and control strategies are analyzed and their relevant changes in the background of ultra-high voltage grid, integrated dispatching mode and renewable energy integration are discussed. Following an overall summary and consideration of the technical practices in the field of intelligent dispatching in AGC, a new control architecture and technologies are proposed to adapt to the changes. Finally, the technical problems of AGC in meeting the demands of the prospective “North China-Central China-East China” synchronous grid are discussed.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A118).

Key words: automatic generation control; smart dispatching; control performance standards; renewable energy control; security constraint; dispatching and control systems