

## 电力市场中 AGC 辅助服务的成本研究综述

王娟娟<sup>1,2</sup>, 李卫东<sup>1</sup>, 赵闻蕾<sup>1,2</sup>, 赵云丽<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024; 2. 大连交通大学电气信息学院, 辽宁 大连 116028)

**摘要:** 基于 AGC 辅助服务自身的特点, 从电厂侧和调度侧两方面研究了 AGC 成本。其中电厂侧的成本包括投资成本、运行成本、维护成本、调度成本和机会成本; 而调度侧的成本有设备投资及维护成本、控制成本与校正成本。给出了电厂侧投资成本的两种量化方法, 考虑了变工况运行对维护成本的影响, 提出了调度成本的量化公式, 分析了机会成本的多种计算思路。调度侧除了考虑了调度主站及主站与电厂之间的设备固定成本, 还从系统整体协调控制的角度分析了易被忽略的控制成本, 给出了校正成本的计算方式。最后就降低 AGC 成本的途径总结了若干可行性建议。

**关键词:** 辅助服务市场; 自动发电控制; 成本分析; 量化计算; 机会成本

### Overview of AGC ancillary service costs in electric market

WANG Juan-juan<sup>1,2</sup>, LI Wei-dong<sup>1</sup>, ZHAO Wen-lei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun-li<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical and Electronics Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** According to the characteristics of AGC(automatic generation control) ancillary service, the costs of AGC are researched from the perspective of the power-station and the dispatch. The former include investment costs, operational costs, maintain costs, dispatch costs and opportunity costs, while the latter are capital and maintenance costs, controlling costs and adjustment costs. From the power-station's point of view, two kinds of quantification methods are applied to calculate investment costs, the influence of instability of units on operational costs are considered, the quantification formula of dispatch costs is addressed, and several thoughts on the opportunity costs are analyzed. With regard to the AGC costs in the dispatch, except for the equipment fixed costs of master station and that between master station and power station, controlling costs prone to be ignored are derived from the angle of the power system's coordination and control, and the quantification methods of adjustment costs are exhibited. The last are some feasible suggestions for reducing the AGC costs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50577002).

**Key words:** ancillary service market; automatic generation control; cost analysis; quantitative calculation; opportunity cost

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0056-05

## 0 引言

随着电力系统管理体制由垂直垄断型向市场竞争型转变, 电力行业也由粗放式管理向精细化方向发展。电力市场环境下, 考虑到辅助服务与主能量作用、服务对象及成本的不同, 将两者区分开, 确定运行区域所需辅助服务的需求量并对其分别收费有助于避免用户之间的交叉补贴, 有利于市场参与者公平竞争。自动发电控制(AGC)是电力系统重要的辅助服务之一, 在 POOL 电力市场模式下, 独

立系统运营商(ISO)须向发电公司购买 AGC 并支付相应费用, 确定 AGC 成本是合理化付费的前提。AGC 在市场上竞价供给时, 准确的成本分析也是进行策略竞价的先决条件。

中国成本协会对成本的定义指为过程增值和结果有效已付出或应付出的资源代价。据此, 本文的 AGC 成本指在满足一定系统要求的前提下, 为了保证 AGC 服务得以供给及在提供 AGC 的过程中所涉及的费用之和。AGC 成本的量化需要多种信息, 如确定可控制的量测范围、开发必要的数据采集系统及研究可有效分离各种成本的技术等<sup>[1]</sup>, 是一个涉及到多方面因素的研究课题。AGC 成本的计

基金项目: 国家自然科学基金(50577002)

算过程中需考虑三方面主要因素: 1) 公平性。成本过低难以调动 AGC 服务提供者的积极性, 不利于系统稳定; 成本过高又会使需求方支付不必要的频率调节费用。2) 可行性。由于参与者的数量及其地理位置的分布, 过于复杂的方法实用性差。3) 透明性。调频市场与主市场相比规模小, 保持调频市场的透明性, 有利于其与主市场的协调。

在垂直一体化管理模式下, AGC 费用包含在发电电价中, 无需单独核算。在 AGC 成本的研究初期, 文献[1-5]从不同角度对 AGC 相关成本进行了定性分析。但随着辅助服务市场的深入发展, AGC 成本的定性分析已不能满足市场发展的需要, 在一定程度上会抑制某些参与 AGC 调节服务电厂的竞价积极性, 也无法更好地体现市场交易的公平性和透明性, 更对降低辅助服务的成本无益。因此, 对现有研究成果进行必要的总结和梳理, 明确其存在的问题和困难, 以便进行必要的进一步的深入研究, 即详实、全面且定量的计算 AGC 成本成为亟待解决的问题。

基于 AGC 的整个闭环控制过程涉及厂网两方, 故其成本包括各电厂为了提供 AGC 服务而实施的成本和调度中心针对 AGC 的协调控制成本, 后者也包含了微波/载波通信线路的相关成本。

## 1 AGC 成本的构成

要提供满足系统要求的 AGC 辅助服务, 首先必须建立 AGC 闭环控制系统, 即需要电厂侧和调度侧投资引进相关设备; 其次, AGC 须由在线运行的发电机组提供, 因此在机组的运行过程中会涉及到运行费用、维护费用; 再者, 在同一时间段各在线机组的出力是有限的, 且只能用作一种用途, 这样就产生了机组的组合成本和机会成本; 与此同时, 调度侧对其所辖机组与区域进行整体协调控制, 才能实时满足系统的稳定运行, 如此就产生了控制成本和校正成本。

综上, 本文将分别从电厂侧和调度侧研究 AGC 成本, 具体解析这两大部分的成本构成及其成因, 接着讨论各种成本的计算方法, 最后总结了降低 AGC 成本的途径。

## 2 电厂侧 AGC 成本

AGC 机组是 AGC 服务的主要提供者, 但电厂还需设置相应的数据传输及协调控制等设备, 而且机组在提供 AGC 的运行过程中也要有额外的损失和损耗。因此, 其成本主要有以下几方面。

### 2.1 投资成本

或称为附加固定成本, 是指为了保障机组提供合格的 AGC 服务, 电厂投入必要的装置所花费的资金及其相关的费用。具体包括额外设置机组容量、安装电厂远动 RTU 或 SCADA、控制器 PLC (包括机组协调控制系统 CCS) 等设备的设备成本, 及设备的调试、测试、评估和升级成本等。如德国<sup>[2]</sup>要求提供 AGC 服务的机组需增加 2.5% 的额外容量。我国安装设备时通常并不考虑其具体功能, 因为同一设备可根据需要发挥不同的作用, 所以机组容量及相关成本可由主能量与各种辅助服务需求者共同承担。

但 AGC 机组调节性能不同, 投资不同。如有些电厂为了使其机组更符合要求的, 或为了在调频市场中更有竞争力, 要对机组进行升级或改造。影响火电 AGC 机组的装置主要有<sup>[6]</sup>: 制粉系统、CCS 中的调频回路、电网调度的功率跟踪回路等, 这些设备成本都属于 AGC 的投资成本。

在 AGC 设备服务年限内要对 AGC 的总投资成本进行回收。每年的投资成本  $C_i$ , 参照目前常用于火电厂总投资费用折旧成本的计算方法<sup>[7]</sup>, 主要有两种。一是等额支付折算法, 即<sup>[4]</sup>

$$C_i = C_{\text{inv}} \times \frac{i \times (1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$$

式中:  $C_{\text{inv}}$  指 AGC 设备总投资费用;  $i$  指资金年利率, 即社会贴现率, 国外一般取为 10%<sup>[7]</sup>;  $T$  指 AGC 设备服务年限。

另一种简化方法是按 AGC 提供时间平均分摊<sup>[5]</sup>, 即年限平均折算法。这里仅考虑 AGC 服务的提供时间, 而不是按 AGC 调节电量分摊, 是因为 AGC 调节出力的目的在于维持系统频率和联络线交换功率基本稳定, 其出力具有随机性。

$$C_i = \frac{C_{\text{inv}}}{T \times 365 \times 24 \times 60} \times T_h$$

式中,  $T_h$  指一年的 AGC 服务时间之和, 单位为 min。

显然等额支付折算法中关于投资成本回收的计算是合理的, 它充分考虑了资金的时间价值, 能保证在  $T$  年内回收到总投资费用在  $T$  时间点上的终值  $C_{\text{inv}} \times (1+i)^T$ 。而年限平均折算法得到的回收值偏低, 不利于电厂资金的积累。只有当贴现率较低, 折旧年限又比较短时, 两者的计算结果才比较接近。但其计算方法简单, 在某些经济体制下 (如计划经济条件下、不充分考虑通货膨胀等因素的影响时) 适用<sup>[7]</sup>。

## 2.2 运行成本

指机组提供 AGC 时所耗费的燃料成本。由于电网中的负荷是随机波动的, 因此机组在投运 AGC 功能期间将调整出力以跟踪电网负荷变化, 结果可能使机组不仅不能运行于相应的最佳运行点, 还处于变工况运行状态, 机组的煤耗将高于稳定工况下的煤耗。

## 2.3 维护成本

这里维护成本的含义与普通电厂相应成本的含义不尽相同。一般电厂这部分费用的构成比较复杂, 这里的维护成本仅指在机组正常运行的前提下, AGC 机组及相关设备由于热耗和磨损而增加的维护所导致的成本。如此定义的原因一方面在于只有处于在线运行状态的机组才可以提供 AGC 服务, 所以机组的正常运行是机组提供 AGC 的前提条件, 从而使此成本不再受制于设备可靠性的高低; 另一方面 AGC 机组与普通机组相比, 机组的维护成本增加。如为了满足系统要求所进行的快速调节会对某些元件(如高压原动机转子和锅炉汽包、高压给水管等)产生热压力<sup>[8]</sup>, 使元件寿命降低, 增加维护成本; AGC 需求信号的频繁转换可导致机组的热耗增加 1%~2%<sup>[9]</sup>; 机组响应出力方向的改变也是产生维护成本的一个重要因素, 机组增/减出力次数增加, 使设备磨损增加, 缩短发电机组的维修周期, 导致维护成本增加。

普通火电厂的这部分成本与电厂每年所耗材料费、维修费、职工工资与福利等费用有关<sup>[10]</sup>。电厂提供主能量时维护成本一般占总发电成本的 11.47%~15.36%。所以, 与机组只提供主能量时相比, 电厂为了提供 AGC 服务而产生的这部分成本应更高。具体的 AGC 机组的维护成本占其总成本的比例, 可根据电厂的现场实际维护情况对所耗材料、维修费进行周期性记录和结帐计算得出。职工工资与福利基金及其他费用相对比较固定, 可不再计入该成本中。

## 2.4 调度成本<sup>[11]</sup>

又被称为机组组合成本或模拟附加费。这部分费用是对机组在模拟调度运行点上被逆序开机的补偿。即主能量和某些辅助服务(如 AGC、旋转备用等)是互为补充的, 如果发电机不生产电能, 就不能出售调节服务。则某时段机组  $i$  单位 AGC 出力的模拟附加费为:

$$C_{\text{loss},i} = \frac{\text{机组最小出力} \times (\text{机组出力成本} - \text{实时电价})}{\text{AGC 竞价数量}}$$

## 2.5 机会成本

所谓机会成本, 指的是将一种资源投入某一特

定用途后所放弃的在其他用途中所能获得的最大利益。因为某种资源一旦用于某种物品的生产就不能同时用于另一物品的生产, 选择了一种机会就意味着放弃了另一种机会。对于厂商而言, 所谓利润最大化, 指的是考虑了机会成本等诸多成本的经济利润最大化, 而不是会计利润最大化。

机会成本的计算思路有多种, 但其实质均是对机组少出力的补偿。

思路一: 对 AGC 机组因提供 AGC 服务而失去部分上调容量参与主市场的机会所产生损失的直接补偿。

考虑两种不同情况: 1) 不考虑 AGC 出力, 时段  $j$  市场边际电价为  $\rho_1$ , 机组  $i$  承担的出力为  $Q_{ij}$ 。2) 各机组考虑其 AGC 约束, 调整基值出力点, 预留上调/下调容量, 此时相应时段主市场的边际电价为  $\rho_2$ 。

设  $\Delta Q_{ij}$  为机组  $i$  由于 AGC 服务约束在时段  $j$  的出力减少量。

则  $j$  时段  $i$  在主市场中的损失为:

$$(Q_{ij} - \Delta Q_{ij}) \times (\rho_2 - c_{ij}) - Q_{ij} \times (\rho_1 - c'_{ij})$$

式中:  $c_{ij}$  为情况 2) 时  $i$  在时段  $j$  的发电成本;  $c'_{ij}$  为情况 1) 时  $i$  在时段  $j$  的发电成本。

若此值大于 0, 表明不存在机会成本, 且利润增加; 若此值小于 0, 存在机会成本。

应注意不同时段机组机会成本不同。此处依据机组提供 AGC 服务而使其利润损失来确定相应机会成本, 而不是按“发电损失等于市场价格乘以损失电量”来补偿, 后者易产生过补偿, 影响市场效率, 造成社会福利损失。

思路二<sup>[12]</sup>: 机组出力报价包括容量报价和电量报价, 其中容量报价反映机组的机会成本。

机组为了提供 AGC 而预留容量, 但容量的调用是概率性事件, 为此每一机组的报价格式可为  $R_i + x * E_i$ , 其中  $R_i$  反映机会成本, 也即机会成本包含在容量报价中;  $E_i$  是电量报价,  $x$  是 AGC 机组被调用发电的概率。

这种方法概念清晰, 但实用性较差, 因为各电厂难以独立地准确确定各机组的  $R_i$  和  $x$ 。且若机组采用多种竞价策略的话, 会对  $x$  产生很大影响, 计算也较复杂。而且这种计算方法仅是对真正成本最小化的近似, 如某竞价者尽力使  $E_i$  减小,  $R_i$  增加, 且不改变其在竞争中的排序。这样只要竞价成功, 无论发电与否均可获得尽可能大的容量成本, 降低电量价格还可增加被调度的几率, 也导致了对机组

容量付费的不一致。

思路三: AGC 提供者的竞价策略不同, 也会产生机会成本<sup>[13]</sup>。

如假设 AGC 各小时需求量均服从正态分布。某电厂白天 (12 h) 发电可变成本小于电能成交价, 夜晚 (12 h) 发电可变成本大于电能成交价, 则此发电商仅在白天出售电能, 而夜晚购买电能。若机组必须要提供一些 AGC 服务, 即为 AGC 预留部分容量, 相应产生的年机会成本为:

$$\sum_{i=1}^{365} \sum_{j=1}^{12} \text{每小时AGC需求量} \times (\text{电能成交价} - c_{\text{night}})$$

其中,  $c_{\text{night}}$  指夜晚发电可变成本。

综上所述, 电厂提供 AGC 辅助服务的年总成本  $C_g$  为上述各成本的年成本之和。文献[3]建议在此成本基础上再上涨约 3%, 以考虑传输损耗。

### 3 调度侧 AGC 成本

为了实现 AGC 闭环控制, 需要在调度侧配置相关 AGC 设备、软件、调度 RTU 等, 在电厂和调度之间要配备微波/载波通信线路。

#### 3.1 设备投资及维护成本

AGC 在调度侧的固定成本主要分为两大部分: 调度主站的 AGC 设施投资费用和通信设施的投资费用, 当然也包括每年投入的人力等成本。其中主站的投资包括各相关软件和硬件的投资以及维护成本。维护成本指如遥测性能不好时变电所和控制中心重新校核及进行常规维护而产生的成本等。此外, 主站计算机系统、能量管理系统及信息传输系统也是系统实现其他 EMS 功能的媒介, 此处 AGC 成本仅占其总投资的一部分, 可根据实际投资情况计算具体所占比例。

#### 3.2 控制成本

指为了保证 AGC 服务的正常供应, 调度中心协调其管辖范围内各机组的运行, 并兼顾主能量市场和其他辅助服务的正常运作。具体包括对非 AGC 机组的协调控制成本和对 AGC 机组的调度控制成本。

例如因提供 AGC 服务, 高性能 AGC 机组出力减少, 需重新调度其他机组提供旋转备用等其他辅助服务而产生的成本。这部分成本难以精确确定, 可根据经验对调度中心进行合理补偿。

此外还包括附加成本, 如调度侧控制区域使其处于最优潮流状态, AGC 的调用可能破坏此最优状态, 由此偏离经济运行点而额外产生的成本 (还包括由此引起网络损耗、阻塞、线路越限等发生变化

而产生的调节成本等)。

#### 3.3 校正成本

AGC 在控制过程中要及时纠正各互联区域的无意交换电量和时钟误差。采取的校正方法<sup>[14]</sup>可以在区域控制偏差 ACE 的计算公式中分别加入无意交换电量的校正量  $\Delta E'_n$  和时差校正量  $\Delta t'_n$ , 并用反方向的累计电量和时差进行校正。

在  $0 \sim t$  时段内, 区域  $n$  的无意交换电量和时间误差分别为:

$$\Delta E_n = \int_0^t (P_a - P_s) dt$$

$$\Delta t = (3600 / f_s) \int_0^t (f_a - f_s) dt$$

式中:  $P_a$ ,  $f_a$  分别为区域  $n$  联络线交换功率和系统频率实际值;  $P_s$ ,  $f_s$  分别为计划值。

TBC 控制模式下,  $n$  区域 ACE 的定义式为:

$$ACE_n = P_a - P_s + B_n (f_a - f_s)$$

式中,  $B_n$  为控制区域  $n$  的频率偏差系数。

考虑无意交换电量和时间偏差补偿后的控制区域  $n$  的 ACE 计算公式为:

$$ACE'_n = P_a - (P_s - \Delta E'_n) + B_n [f_a - (f_s - \Delta t'_n)]$$

式中:  $\Delta E'_n = \Delta E_n / H$ ,  $\Delta t'_n = \Delta t_n \cdot f_s / 3600T$ ,  $H, T$  分别为  $\Delta E_n$ ,  $\Delta t_n$  的校正时间段。

则  $\Delta ACE_n = ACE'_n - ACE_n = \Delta E'_n + B_n \Delta t'_n$

AGC 需求增量的成本即为区域  $n$  的修正成本。

### 4 降低 AGC 成本的方法

通过分析影响 AGC 成本的因素, 有针对性地降低成本, 才会使相关部门在竞争中保持优势。

#### 4.1 电厂侧降低 AGC 成本的方法

电厂可采用特定的频率控制策略<sup>[3]</sup>, 在保证系统可靠性的前提下, 减少发电机的动态响应次数和调整出力, 从而使频率调节成本最低。

#### 4.2 调度侧降低 AGC 成本的方法

调度中心一方面可调度机组使其运行在效率最高点 (如水电机组的效率最高点为 the project point<sup>[15]</sup>; 在调节级和压力级的共同作用下汽轮机也可达到其相应的效率最高点<sup>[16]</sup>), 此时 1) 效率最高, 同样出力情况下发电成本最低; 2) 部分 AGC 调节容量无额外成本。另一方面, 在 POOL 运行模式下, 调度的 AGC 机组越接近其出力优化排队顺序, 调节成本越低。

不同的控制区拥有的发电资源不同, 为满足 AGC 需求而支付的成本相差很大。联合 AGC 调节<sup>[17]</sup>可产生显著的经济效益, 即在较大范围内统一

使用 AGC 调节容量比在较小范围内使用经济的多。根据美国西部区域输电组织 (WESTRTO) 的研究结论, 该区域作为单一控制区对调节服务容量的需求, 仅为该区域十个控制区对调节容量需求总和的 2/5。主要原因是联合 AGC 调节可在较大的范围内对辅助服务资源实行共享, 实现资源的优化配置, 降低运行费用, 提高经济效益。

此外, 避免 AGC 调节量严重不足的情况发生也可减少系统的此成本; 控制区的调度机构明智合理地选择 AGC 机组, 仔细分配非 AGC 机组的出力, 可使此区域总生产成本降低<sup>[18]</sup>。

## 5 结语

随着电力体制改革的逐步深化, 电厂不再无偿提供 AGC 调节容量。辅助服务的市场化, 使得买卖双方需要量化的 AGC 成本作为交易的依据。本文从电厂侧和调度侧两方面进行了 AGC 成本的研究。电厂侧 AGC 成本中投资成本有两种适用于不同条件下的计算方法; 考虑到 AGC 调节的特殊性, 虽然维护成本和附加费占总成本的比例较小, 但也是不可缺省的部分; 而机会成本的计算可从不同角度进行考虑。调度侧 AGC 成本中控制成本易被忽略, 但在新的市场环境下, 调度侧为了保证 AGC 闭环控制的正常运行而进行的控制协调工作也需要得到补偿; 而校正成本则可通过计算 AGC 的增量成本而得到。

文中最后分析总结了降低 AGC 成本的相关方法, 在明确 AGC 成本组成的基础上, 多方面采用不同措施降低其成本, 使 AGC 在满足系统需求的同时实现经济运行。

## 参考文献

- [1] ERIC HIRST, BRENDAN KIRBY. Costs for electric-power ancillary services[J]. The Electricity Journal, 1996, 9 (10): 26-30.
- [2] KONSTANTIN STASCHUS. Review of german approaches to ancillary services costing and pricing[C].// Proceedings of IEE Colloquium on Pricing of Ancillary Services. London(UK): 1996.
- [3] GRAEME A, CHOW N, BRIAN WIGDOROWITZ. A methodology for the redesign of frequency control for AC networks[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19 (3): 1546-1554.
- [4] 陶春华, 马光文. 电力市场环境下 AGC 成本研究[J]. 华东电力, 2006, 34 (4): 5-6.  
TAO Chun-hua, MA Guang-wen. AGC cost in power market[J]. East China Electric Power, 2006, 34 (4): 5-6.
- [5] 周峰, 温步瀛, 程浩忠. 电力市场条件下发电厂 AGC 运行成本研究[J]. 华北电力技术, 2002, 10: 31-33.  
ZHOU Feng, WEN Bu-ying, CHENG Hao-zhong. Research on cost of AGC in power market[J]. North China Electric Power, 2002, 10: 31-33.
- [6] 余燕山, 盛德仁, 任浩仁. 自动发电控制 (AGC) 的结构分析及实际应用[J]. 华东电力, 2005, 33 (4): 52-55.  
YU Yan-shan, SHENG De-ren, REN Hao-ren. Structure analysis of AGC and its application[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (4): 52-55.
- [7] 焦树建. 关于电厂发电成本计算方法的探讨[J]. 燃气轮机技术, 2000, 13 (3): 7-10, 36.  
JIAO Shu-jian. About the methods of calculation on generating cost in power plants[J]. Gas Turbine Technology, 2000, 13 (3): 7-10, 36.
- [8] REASON J. When a slower ramp rate makes economic sense[J]. Electrical World, 1988, 4: 38-39.
- [9] BRANDWAJN V, LPAKCHI A, SHERKAT V. Tracking evolutionary trends in generation control[J]. IEEE Computer Application in Power, 1993, 1 (6): 22-26.
- [10] 张晓东. 发电企业成本分析与市场竞争[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.  
ZHANG Xiao-dong. Power generator's cost analysis and market competition strategies[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [11] ERIC HIRST. Maximizing generator profits across energy and ancillary-services market[J]. The Electricity Journal, 2000, 13 (5): 61-69.
- [12] HARRY SINGH. Auctions for ancillary services[J]. Decision Support Systems, 1999, 24: 183-191.
- [13] GREGOR VERBIC, FERDINAND GUBINA. Cost-based models for the power-reserve pricing of frequency control[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19 (4): 1853-1858.
- [14] 崔志. “四大网”引进的 AGC 软件原理及特点[J]. 电力系统自动化, 1990, 14 (4): 39-46.  
CUI Zhi. An introduction to the basic principle and characteristics of the AGC software used in the four regional power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1990, 14 (4): 39-46.
- [15] SOUSA T, JARDINI J A, MASUDA M, et al. Spinning reserve opportunity cost in hydroelectric plants[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco: 2005, 6: 2064-2069.
- [16] 刘双白. 汽轮机定滑压运行曲线测试方法研究[J]. 华北电力技术, 2007, 12: 9-12.  
LIU Shuang-bai. Test method of rated-sliding pressure operation curve of steam turbine[J]. North China Electric Power, 2007, 12: 9-12.
- [17] PROWSE D C H, KOSKELA P, GROVE T A, et al. Experience with joint AGC regulation[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1994, 9 (4): 1974-1979.

KUAI Di-zheng, WAN Da, ZHOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (2): 81-82.

[8] 钟连宏, 陆培均, 仇志成, 等. 直流接地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003, 29 (8): 12-13, 28.

ZHONG Lian-hong, LU Pei-jun, QIU Zhi-cheng, et al. The influence of current of DC earthing electrode on directly grounded transformer[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (8): 12-13, 28.

[9] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算[J]. 高电压技术, 2004, 30 (11): 48-49.

MA Wei-min. DC biasing current in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 48-49.

[10] 李晓萍, 文习山, 陈慈莹. 单相变压器直流偏磁励磁电流仿真分析[J]. 高电压技术, 2005, 31 (9): 8-10.

LI Xiao-ping, WEN Xi-shan, CHEN Ci-ying. Simulating analysis of exciting current of single phase transformer on DC Bias[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 8-10.

[11] 蒯狄正. 电网设备直流偏磁影响检测分析与抑制[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

KUAI Di-zheng. Inspection analysis and restraining of DC transmission on power grid equipment[D]. Nanjing: University of Science and Technology, 2005.

[12] 张燕秉, 刘连光, 姚谦. 基于PSCAD/EMTDC的电网GIC影响仿真分析[J]. 华北电力技术, 2004(6): 10-13.

ZHANG Yan-bing, LIU Lian-guang, YAO Qian. Simulation analysis on GIC effect on power grids based on PSCAD/EMTDC[J]. North China Electric Power, 2004 (6): 10-13.

[13] 姚纓英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.

YAO Ying-ying. Research on the DC bias phenomena of large power transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2000.

[14] 郝治国, 余洋, 张保会, 等. 高压直流输电单极大地方式运行时地表电位分布规律[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (6): 10-14.

HAO Zhi-guo, YU Yang, ZHANG Bao-hui, et al. Earth surface potential distribution of HVDC operation under monopole ground return mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (6): 10-14.

[15] Tay Hock-Chuan, Swift G W. On the problem of transformer overheating due to geomagnetically induced currents[J]. IEEE transaction on PAS, 1985, 104 (1): 212-219.

[16] Sakis Meliophonlos A P, Glytsis E S, Cokkinides G J. Comparison of SS-GIC and MHD-EMP-GIC effects on power systems[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9 (1): 194-207.

[17] Albertson V D, et al. Load-flow studies in the presence of geomagnetically-induced currents[J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(2): 594-607.

[18] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31 (9): 8-10.

ZENG Lian-sheng. Impact of HVDC ground electrode current on the adjacent power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (9): 8-10.

收稿日期: 2009-12-14; 修回日期: 2010-01-21

作者简介:

余洋(1982-), 男, 硕士, 助教, 从事电力系统自动化、风力发电等方面研究; E-mail: ncepu\_yy@163.com

韦晨(1985-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作;

朱林(1981-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护及现场安装调试维护工作。

(上接第 60 页 continued from page 60)

[18] HENDERSON P D, KLALAMN H, GINETTI J, et al. Cost aspects of AGC, inadvertent energy and time error[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1990, 5 (1): 111-118.

王娟娟(1978-), 女, 讲师, 博士研究生, 从事电力系统分析方面的教学工作, 研究领域为电力市场辅助服务; E-mail: wjj\_21257@sina.com

李卫东(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析方面的教学工作, 研究领域为互联电网运行控制性能评价标准、电力市场理论与应用、人工智能在电力系统中的应用等。

收稿日期: 2009-12-25; 修回日期: 2010-03-10

作者简介: