

# 自动发电控制 (AGC) 联合静态试验和热态试验研究

时海刚

(山东省电力学校, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 为了满足电网 AGC 控制的要求, 必须测试发电厂控制器的实时负荷跟踪性能, 以确定能否参与 AGC 调节。面对火力和水力(或抽水蓄能)发电厂的 AGC 负荷响应特性存在很大差异的问题, 提出必须有针对性地分别进行试验, 以反映实际情况。制定了 AGC 试验方法和步骤, 并着手进行离线静态模拟和实时热态跟踪两种情况的试验, 得出试验数据和曲线。对试验数据进行了分析, 得出 AGC 控制性能指标, 从而为系统 AGC 联调提供试验依据和必要的工程准备。

**关键词:** 自动发电控制; 静态试验; 热态试验; 智能电网; 负荷分配; 发供平衡; 区域误差; 调差率; 功-频特性

## Analysis and experimentation research of the static test and hot test of the automatic generation control (AGC)

SHI Hai-gang

(Shandong Electric Power School, Taian 271000, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of grid AGC control, it has to test the real-time tracking performance of power plant controllers to assure if the controllers can be used in the AGC adjustment. This paper puts forward to test individually to reflect the actual condition for the situation that there are great differences of the AGC load response performance in the thermal power plant and hydraulic power plant. Then this paper makes the method and procedures of AGC test, and does the tests of offline static simulation and real-time online tracking to get the test data and curve. At last, it analyzes the test data to get the AGC control performance index, and thus to provide the test reference and necessary project preparation for the AGC combined adjustment of the system.

**Key words:** automatic generation control (AGC); static test; hot test; smart grid; load distribution; balance of the generation and supply; regional error; adjustment rate; characteristics of the power-frequency

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0065-06

## 0 引言

近年来, 电力系统规模不断扩大, 风能、太阳能等新能源快速发展, 电源以及电网负荷越来越分散, 负荷的变化速率也越来越快。同时, 由于这些负荷随时变化的新能源的加入, 给电网控制带来一定困难。因此, 必须采取一定的技术手段, 实时对电网的质量指标进行调整和控制, 避免严重影响电网的运行。这种技术手段称为自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC)<sup>[1]</sup>。AGC 负责对电网和电源企业进行协调, 在维持电网频率稳定的同时能快速响应多种接入能源的负荷变化, 是保持发电功率与负荷功率平衡的关键。风头正劲的智能电网技术虽将能源资源开发、输送、存储、转换(发电)、输电、配电、供电、售电、服务以及蓄能与能源终端用户的各种电气设备和其它用能设

施通过数字信息化网络连接在一起<sup>[2]</sup>, 但其核心依然是 AGC。AGC 一改过去电力系统频率和有功功率的控制电源侧各发电企业分别进行的局面, 而是根据发电机组的调节性能及在电网中的地位进行分类, 再把电网负荷指令变为每个机组的负荷指令, 进行分别控制, 快速实现发供平衡。由此可见, AGC 必须同时满足电网调度和电源企业控制的要求。而每台机组的 AGC 特性将直接影响控制效果, 也必将影响电网的性能。通过对组网的每台发电机组进行试验, 便能获得机组及系统的 AGC 特性参数, 然后对试验数据进行分析, 以提高 AGC 的控制效果。在此基础上再进行全厂 AGC 试验, 单个控制区联调及多个控制区的联调。由于火力发电和水力发电的调节特性存在根本不同, 因此, 一般情况下, 火力发电厂常采取单台机组 AGC 试验方案, 而配有多台发电机组的水电厂采用全厂 AGC 试验方案。

### 1 AGC概述

#### 1.1 电力系统的负荷变化及频率调节

电力系统频率波动的主要原因是发电机组输入功率与输出功率（负载）的失衡。尽管原动机输入功率也在随时变化，但通过改善自身的调速器特性便可很容易地进行控制。因此失衡的状况更多取决于负荷和同网其他发电机的运行工况。

众所周知，电力系统一次调频是有差调节。比如火力发电厂中，一次调频并没有改变锅炉的燃烧状况，在调节的瞬间，仅仅利用了蓄热，早晚还是要回到以前的状态。因此，必须采用二次调频，也就是AGC。它能充分调动各种资源，维持电网能量平衡，实现无差调节。比如在采用CCS的火电厂中，AGC同时把指令送给汽轮机和锅炉，使它们同时响应负荷的变化而又满足对汽压的规定。当然，最终还要实现三次调频（经济负荷分配），但笔者认为，现在的AGC技术应包括经济负荷分配的内容。

#### 1.2 AGC系统的结构和功能

AGC系统的结构<sup>[3]</sup>如图1所示。

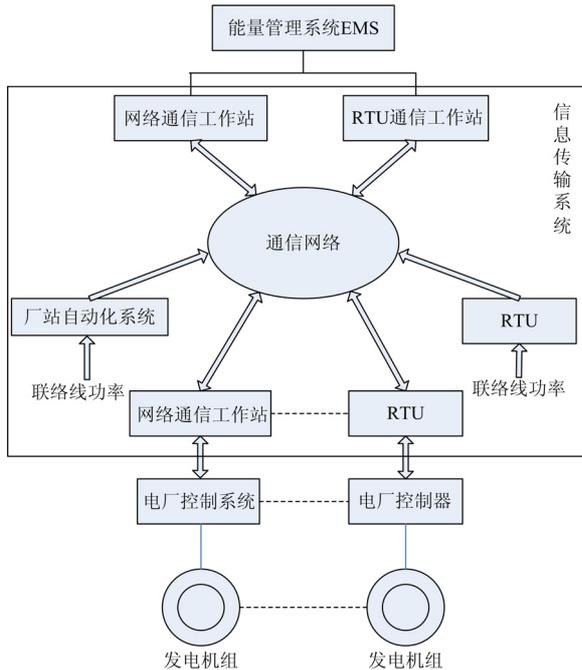


图1 AGC系统的结构图

Fig.1 Structure of the AGC system

AGC的功能要求如下：

(1) 火力发电厂机组的热工自动控制系统（一般采用分散控制系统DCS）必须在自动方式运行，且协调控制系统（CCS）必须在“协调控制”方式；水电厂自动控制系统及功率调节装置应可靠运行。

(2) 电网调度中心的能量管理系统（EMS）、通

信网络、电厂端的远方终端（RTU）必须都在正常工作状态，并能从EMS的终端上直接改变CCS（或水电厂自动控制系统）中的调度负荷指令。CCS（或水电厂自动控制系统）能直接收到从EMS下发的要求执行自动发电控制的“投入”和“切除”信号、“调度负荷指令”的模拟量信号（标准接口为4~20 mA DC），EMS能接收到CCS（或水电厂自动控制系统）的反馈信号、协调控制方式信号和AGC“投/切”信号。

(3) EMS下达的“调度负荷指令”信号与电厂机组实际出力的绝对偏差必须控制在允许范围内。

(4) 机组在自动控制方式下运行，直接由电网调度中心远方控制。自动控制系统的自动负荷设定器的输出负荷指令自动跟踪调度负荷指令；在就地控制时，调度负荷指令自动跟踪机组实发功率。

### 2 试验目的和实现

AGC必须使全系统的发电出力和负荷功率相匹配；将电力系统的频率偏差调节到零，保持系统频率为额定值；控制区域间联络线的交换功率与计划值相等，实现区域内有功功率的平衡；在区域内各发电厂间进行负荷的经济分配。

AGC试验的目的是测试电厂控制器和机组是否满足网调AGC控制技术的要求，检查机组适应负荷变化的能力，当机组在一定负荷范围内变化时，按一定线性关系和速率跟踪网调要求的负荷指令出力。

对于火力发电机组，AGC控制目标是使由于负荷变动而产生的区域误差ACE（Area Control Error）不断减少直至为零。网调通过AGC可调整电网发电出力与电网负荷平衡，将电网频率偏差调节到零，保持电网频率为额定值，在控制区内分配发电出力，维持区域间联络线交换功率在计划值内，降低区域运行成本。在AGC功能实现过程中，RTU为网调或自动调度系统（ADS）与DCS建立了联络通道。RTU接受网调的AGC控制信息，发送至DCS；RTU接收并将DCS送出的机组AGC“投/切”等状态量，传送至网调。机组已经正常运行，具备带满负荷、安全稳定运行的能力；DCS的各种功能经过试验已投入运行，各模拟量控制系统投入自动运行，调节品质达到机组要求；负荷摆动试验已经成功，机组保护全部投入。试验应在网调要求的负荷范围内的正常工况下进行。

对于水力发电厂，AGC控制目标和火力发电机组类似，区别在于控制系统接收的是全厂AGC指令，然后根据设备情况进行功率的二次分配，由每

台机组的功率调节装置完成调节<sup>[4]</sup>。

### 3 试验方法及步骤

#### 3.1 火力发电机组的AGC试验

某300 MW火力发电机组<sup>[5]</sup>,网调给出AGC控制的各项技术要求:控制范围为250~300 MW,负荷变化率不小于6 MW/min。

整定机组控制器的信号接收范围(4~20 mA),并且下限对应机组调节范围的下限,上限对应机组满负荷。根据系统原理图、接线图检查电气远动RTU到DCS的遥调接口接线正确。确认接入DCS系统的负荷控制指令信号正确。

DCS与RTU的接口信号如表1所示。

表1 DCS与RTU的接口信号

Tab.1 Signal of the interface between the DCS and RTU

序号	测点名称	测点类型(DCS)	测点类型(RTU)	信号量程	工程量程
1	AGC负荷指令	AI	AO	4~20 mA	250~300 MW
2	机组AGC投入	DO	DI		

##### 3.1.1 静态试验

###### (1) 远动与DCS的接口信号静态试验

从DCS模拟AGC投入信号,检查远动系统接收此信号正确无误;从远动模拟输出AGC负荷指令信号,DCS接收此信号正确无误。

(2) 检查DCS系统中AGC功能的软件组态,对不符合现场要求的一律予以整改。

(3) 对静态参数进行检查和设置。

(4) 模拟满足AGC“投/切”条件,AGC“投/切”时,系统无扰动,不影响机组的安全运行。AGC“投入”时,模拟AGC控制指令信号,机组负荷控制动作方向与AGC控制指令相一致。

##### 3.1.2 热态试验

机组炉膛负压控制系统、给水控制系统、燃烧控制系统、风量控制系统(含氧量校正)、主/再热蒸汽温度控制系统等子系统投入自动且工作稳定的状况下,首先将DEH切为CCS遥控方式投入汽轮机主控自动,机/炉主控制器控制方式为汽轮机跟随(TF)方式;相继投入给粉机自动及锅炉主控自动,机/炉主控制器控制方式转换为协调控制方式。当机组协调控制稳定后,进行AGC大负荷爬坡试验。

机组AGC试验在AGC控制负荷250~300 MW范

围内进行,分下坡和上坡两个阶段进行。

(1) 在网调允许和调度下,发出AGC指令进行下坡段AGC降负荷试验,试验数据如表2所示。

试验开始时负荷为302 MW,机组负荷变化率上限设定为6 MW/min。AGC指令负荷目标250 MW,负荷变动量为2 MW,到达目标值后,进入稳态,负荷为252 MW。试验过程中AGC指令进行了下降试验,机组负荷变化率上限未作改变,保持6 MW/min,AGC功率动态偏差在±4 MW内,稳态偏差在±1 MW内。试验时参数变化如表3所示。

表2 下坡段AGC指令和机组负荷对照表

Tab.2 Comparison form of the AGC order and unit load in downhill section

序号	时间	AGC指令/MW	机组负荷/MW
1	16:55' 40"	299.95	302.04
2	16:56' 40"	295.71	301.20
3	16:57' 40"	292.10	297.45
4	16:58' 40"	292.56	298.16
5	16:59' 40"	290.66	291.49
6	17:00' 40"	286.47	286.04
7	17:01' 40"	282.73	281.83
8	17:02' 40"	280.83	280.77
9	17:03' 40"	275.65	277.85
10	17:04' 40"	271.92	273.24
11	17:05' 40"	269.09	269.94
12	17:06' 40"	264.81	266.35
13	17:07' 40"	261.07	262.48
14	17:08' 40"	256.88	258.32
15	17:09' 40"	253.63	255.14
16	17:10' 40"	249.83	252.08

表3 下坡段主要参数变化表

Tab.3 Form of the main parameters changing in downhill section

序号	被控参数	动态偏差	稳态偏差
1	实际功率	±4 MW	±1.0 MW
2	主蒸汽压力	±0.50 MPa	±0.1 MPa
3	主蒸汽温度	±3 °C	±2 °C
4	再热汽温度	±5 °C	±3 °C
5	炉膛压力	±100 Pa	±60 Pa

试验时的负荷跟踪详细情况见图2。

(2) 在网调调度下,发出AGC指令进行上坡段AGC升负荷试验,试验数据如表4所示。

试验开始时负荷为250 MW,机组负荷变化率上限设定为6 MW/min。AGC指令负荷目标300 MW,负荷变动量为2 MW,到达目标值后,进入稳态,

负荷为 297.9 MW。试验过程中 AGC 指令进行了上升试验, 试验过程中机组负荷变化率上限未作改变, 保持 6 MW/min, AGC 功率动态偏差在±2 MW 内, 稳态偏差在±1 MW 内。试验时参数变化如表 5 所示。

表4 上坡段AGC指令和机组负荷对照表

Tab.4 Comparison form of the AGC order and unit load in uphill section

序号	时间	AGC指令/MW	机组负荷/MW
1	17:13' 04"	251.28	250.91
2	17:14' 04"	254.03	253.20
3	17:15' 04"	258.27	256.06
4	17:16' 04"	261.10	259.36
5	17:17' 04"	264.87	263.55
6	17:18' 04"	269.11	267.14
7	17:19' 04"	272.88	271.00
8	17:20' 04"	277.10	274.34
9	17:21' 04"	279.93	278.86
10	17:22' 04"	281.07	280.21
11	17:23' 04"	285.08	283.07
12	17:24' 04"	288.74	287.54
13	17:25' 04"	292.10	291.21
14	17:26' 04"	295.81	295.36
15	17:27' 04"	299.95	297.96

表5 上坡段主要参数变化表

Tab.5 Form of the main parameters changing in uphill section

序号	被控参数	动态偏差	稳态偏差
1	实际功率	±2 MW	±1.0 MW
2	主蒸汽压力	±0.50 MPa	±0.1 MPa
3	主蒸汽温度	±3℃	±1℃
4	再热蒸汽温度	±4℃	±2℃
5	炉膛压力	±105 Pa	±50 Pa

试验时的负荷跟踪详细情况见图2。

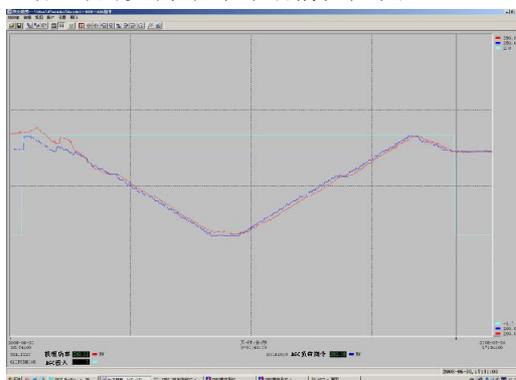


图2 AGC降升负荷试验曲线图

Fig.2 Chart of the load rising and declining of AGC

### 3.1.3 试验数据分析

从试验结果来看, 整个AGC过程中引起的最大动态偏差为±4 MW, 稳态偏差±1 MW。动态偏差为机组实际功率在AGC过程中与调度AGC功率的最大差值, 将对整个电网的频率产生一定影响。影响频率的程度可用电力系统综合功率(负荷和发电机功率)一频率特性来进行分析, 它能真实反映负荷功率变化量与实际频率变化量之间的关系。

功一频特性公式如下:

$$\Delta P_L = (K_G + D)\Delta f = \beta \Delta f$$

式中:  $\Delta P_L$  表示负荷功率增量;  $K_G$  表示发电机的功频静特性系数(或称单位调节功率), 即调差率  $R$  的倒数;  $D$  表示负荷的频率调节效应系数;  $\Delta f$  表示引起的频率变化量;  $\beta = K_G + D$  为响应系数, 表示系统的频率响应特性, 单位MW/0.1 Hz。

需要说明的是:  $D$  是随时变化的, 代表了负荷具有随时变化的特点, 而  $K_G$  是可以整定的, 代表了电源侧控制性能。

若调差率  $R$  整定为5%,  $D$  取2, 则  $\beta = 22$  MW/0.1 Hz。

最大频率调节范围:

$$\Delta f = \Delta P_L / \beta = \pm 50 \times 0.1 / 22 \approx \pm 0.228 \text{ Hz}$$

最大频率响应速度:

$$\Delta f_v = \Delta P_L / \text{min} / \beta = \pm 6 \times 0.1 / 22 \approx \pm 0.027 \text{ Hz/min}$$

最大误差影响频率:

$$\Delta f = \Delta P_L / \beta = \pm 4 \times 0.1 / 22 \approx \pm 0.018 \text{ Hz}$$

即在不考虑其他机组参与一次调频、联络线交换功率的情况下, 该机组的 AGC 频率控制范围为±0.228 Hz, 最大频率响应速度为±0.027 Hz/min, 最大动态偏差影响频率±0.018 Hz。

由此看出, 该机组功率与 AGC 功率动态偏差较小, 负荷调整较精确, 机组控制器线性度较好。

### 3.2 水力发电厂的 AGC 试验

某配置 5 台机组的水电厂网调给出 AGC 控制的各项技术要求: 控制范围为 80~240 MW, 负荷变化率不小于 30 MW/min。1#、2#、4#、5#机组参与 AGC 调节, 3#机带 30 MW 基本负荷, 不参与 AGC 调节。

整定机组控制器的信号接收范围(4~20 mA), 并且下限对应机组调节范围的下限, 上限对应机组满负荷。

根据系统原理图、接线图检查电气远动 RTU 到计算机监控系统接线正确。确认接入监控系统的负荷控制指令信号正确, 如表 6 所示。

表6 监控系统与RTU的接口信号

Tab.6 Signal of the interface between the monitoring system and the RTU

序号	测点名称	测点类型 (DCS)	测点类型 (RTU)	信号量程	工程量程
1	AGC 负荷指令	AI	AO	4~20 mA	80~240 MW
2	全厂 AGC 投入	DO	DI		

### 3.2.1 静态试验

从监控系统模拟AGC投入信号, 检查远动系统接收此信号正确无误; 从远动模拟输出AGC负荷指令信号, 监控系统接收此信号正确无误; 模拟分配机组负荷, 机组功率调节器与预先设定的相吻合。

由于3#机不参与AGC试验, 因此要修改完善AGC控制值, 确保与调度指令完全一致。

模拟满足AGC“投/切”条件, AGC“投/切”时, 系统无扰动, 不影响机组的安全运行。AGC“投入”时, 模拟AGC控制指令信号, 机组负荷控制动作方向与AGC控制指令相一致。

### 3.2.2 热态试验

将电厂实际功率由240 MW开始下降至80 MW, 再从80 MW逐渐升至240 MW。

(1) 在网调允许和调度下, 进行降负荷响应试验, 试验数据如表7所示。

表7 降负荷段AGC指令和机组负荷对照表

Tab.7 Comparison form of the AGC order and unit load in load declining section

序号	时间	AGC指令/MW	机组负荷/MW
1	14:20'	234	232
2	14:24'	221	222
3	14:26'	199	187
4	14:28'	153	156
5	14:30'	145	136
6	14:32'	145	138
7	14:42'	118	107
8	14:44'	94	70
9	14:46'	80	83
10	14:48'	78	78

14:30' 时, 5#机停机, 14:44' 时, 2#机停机。

最大动态偏差为±24 MW, 稳态偏差±2 MW。

(2) 同样进行了升负荷响应试验, 试验数据如表 8 所示。

14:58' 时, 5#机开机, 15:14' 时, 2#机开机。

最大动态偏差为±30 MW, 稳态偏差±7 MW。

表8 升负荷段AGC指令和机组负荷对照表

Tab.8 Comparison form of the AGC order and unit load in load rising section

序号	时间	AGC指令/MW	机组负荷/MW
1	14:52'	78	78
2	14:54'	86	79
3	14:56'	112	104
4	14:58'	121	118
5	15:00'	136	118
6	15:02'	138	108
7	15:04'	139	126
8	15:13'	176	154
9	15:14'	179	176
10	15:16'	194	183
11	15:20'	230	223

### 3.2.3 试验数据分析

若调差率  $R$  整定为5%,  $D$  取2, 则  $\beta = 22 \text{ MW}/0.1 \text{ Hz}$ 。

最大频率调节范围:

$$\Delta f = \Delta P_L / \beta = \pm 160 \times 0.1 / 22 \approx \pm 0.727 \text{ Hz}$$

最大频率响应速度:

$$\Delta f_v = \Delta P_L / \min / \beta = \pm 30 \times 0.1 / 22 \approx \pm 0.136 \text{ Hz/min}$$

最大误差影响频率:

$$\Delta f = \Delta P_L / \beta = \pm 30 \times 0.1 / 22 \approx \pm 0.136 \text{ Hz}$$

由此看出, 该电厂在不考虑其他机组参与一次调频、联络线交换功率的情况下, AGC频率控制范围为±0.727 Hz, 最大频率响应速度为±0.136 Hz/min, 能满足控制范围为80~240 MW, 负荷变化率不小于30 MW/min的要求。但是实际功率与AGC功率动态偏差较大, 最大动态偏差影响频率达到±0.136 Hz, AGC总体控制效果不佳。还可看出, 电厂控制器线性度较差, 甚至还有跳变的情况发生。

## 4 结论

本文介绍的AGC联合静态试验和动态试验, 能够检验发电机组在硬件、软件、逻辑通信等方面与AGC系统的配合情况; 检验机组能否满足一定的控制范围, 且在控制范围内, 控制器输入(也就是AGC

输出)与机组功率的输出是否成线性关系;检验机组能否满足一定的调节速率,且调节速率的变化对机组的影响是否在允许限度内。进行试验时,控制系统接口、数据通信、机组本身的调节品质、静态模拟须先予保证,AGC实际跟踪情况再在动态试验中不断地修改完善,直到达到AGC的要求。可以看出,该火电机组的AGC跟踪效果较好,动态偏差对频率的影响较小,但响应速度不够快,调节范围也不够大,AGC可以投入,以响应变化缓慢的负荷变化。而该水电厂的AGC跟踪效果较差,动态偏差对频率的影响较大,不能立即投入AGC,必须对机组监控系统进行必要修改,以改善机组功率跟踪AGC的线性度。若偏差能有效下降到允许范围内,即可投入AGC,以跟踪变化快速的负荷变化。

总之,尽管试验提供了AGC必要的数 据,提高了AGC水平,但也应看到,有些区域负荷变化较大,如无其他调节手段,仅靠AGC通过联络线来交换功率显得过于困难。因此,应在大变负荷区域布置水电厂(或抽水蓄能电站)来提高负荷响应速度,这就需要在电网规划阶段放眼长远,对电源和负荷的发展趋势进行分析和预测,然后进行合理

布局。

### 参考文献

- [1] 张磊,彭德振.大型火力发电机组集控运行[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等.智能电网技术综述[J].电网技术,2009,33(8):1-7.  
CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [3] 于尔铿,刘广一,周京阳,等.能量管理系统(EMS)[M].北京:科学出版社,1998.
- [4] 电力系统调频与自动发电控制编委会.电力系统调频与自动发电控制[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [5] 国电十里泉发电厂6#机AGC试验报告[M].山东:国电十里泉发电厂,2006.

收稿日期:2009-08-22; 修回日期:2009-10-31

作者简介:

时海刚(1971-),男,电力工程技术工程师、工程硕士,主要研究方向为控制工程、电工电子、电力系统、信息技术等。E-mail: shihaidx@yahoo.com.cn

(上接第64页 continued from page 64)  
访问与平台无关的服务、对象和服务器的协议<sup>[7]</sup>。利用SOAP协议传输电力系统中的信息,可以实现不同平台之间的通信,而且很容易通过防火墙,在接收端也不需要安装特定的接收软件,只要有浏览器即可浏览数据,节约了大量的资金。随着电力系统中客户端的不断增加,利用SOAP协议传输电力系统中的信息是十分有意义的。

### 参考文献

- [1] 曹厚继.利用SOAP技术实现电力系统信息的传输[D].保定:华北电力大学,2008.  
CAO Hou-ji. Realization of power system information transmission based on SOAP[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [2] Hossenlopp L. Engineering perspectives on IEC 61850[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(3): 45-50.
- [3] 曾铮,吴明晖,应晶.简单对象访问协议SOAP综述[J].计算机应用研究,2002,19(2):5-8.  
ZENG Zheng, WU Ming-hui, YING Jing. Summary of simple object access protocol[J]. Application Research of Computers, 2002, 19(2): 5-8.

- [4] Dave Mercer. XML编程起步[M].袁鹏飞,译.北京:人民邮电出版社,2001.
- [5] 邓昱,曾文华.SOAP的原理及实现[J].杭州电子工业学院学报,2002,22(3):19-23.  
DENG Yu, ZENG Wen-hua. Theory and realization of SOAP[J]. Journal of Hangzhou Institute of Electronic Engineering, 2002, 22(3): 19-23.
- [6] Richard Monson-Haefel. J2EE Web Services[M].崔洪斌,王爱民,译.北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 苏丹娣,肖少非,邹成武.利用SOAP实现异构系统之的信息交互[J].计算机与现代化,2004(9):57-59,62.  
SU Dan-di, XIAO Shao-fei, ZOU Cheng-wu. Realization of information interaction between heterogeneous system with SOAP[J]. Computer and Modernization, 2004(9): 57-59, 62.

收稿日期:2009-08-04; 修回日期:2009-09-16

作者简介:

曹厚继(1981-),男,工程师,硕士,从事电力设计相关工作;E-mail: caohouji\_28@163.com

贾云辉(1975-),男,工程师,学士,从事电力设计相关工作。