

一种新型智能电网的体系结构探讨

廖环宇，吴胜华

(国电南京自动化股份有限公司，江苏 南京 210032)

摘 要：近年来，智能电网受到国内外的广泛关注。本文在提出了一种实现智能电网功能的基础体系架构，并采用一种具有创新性的分布式自主状态估计方法，对电网的运行状态进行实时估计。在这个架构的基础上，本文详细讨论了线路故障检测、负载分配、网损最小化以及供电可靠性保证等智能电网的高级应用的实现方法。本文提出的智能电网体系具有广泛的应用前景，为智能电网的构建提供关键性技术指导。

关键词：智能电网；体系结构；状态估计；优化方法

0 引言

随着国家对电力系统现代化建设的重视程度不断增加，许多专家学者也都开始了针对智能电网技术所进行的相关研究^[1]。关于智能电网的控制和运行方面的研究，国外目前已经进入到了规划和实验阶段，并为将来的大规模建设做好了前期准备工作。国外在电力系统基础设施的建设方面，开始通过采取安装分布式电网资源、电能存储装置、动态无功补偿器、自动继电器和智能开关等措施为电网的智能化建设铺路^[2]。

智能电网主要是为了通过先进的控制设备和手段保证电网安全、降低网损、平衡电网负荷以及提高运行可靠性等目的^[3]。从而节约电网运行成本，实现其安全、环保优化运行。本文采用一种基于分布式网络结构与通讯系统的智能电网体系，并提出一种新型的状态估计方法。该状态估计方法通过负荷平衡与减低高峰负荷优化供电系统，通过电网的损耗最小化实现电能的最优输送，从而最终提高电力系统动态运行的可靠性。

1 智能电网体系结构

由于各国在智能电网发展的思路和侧重点各不相同，因此智能电网的体系结构组成也有所区别^[4]。但是，总的说来智能电网体系都是以整个电网能够安全、合理化运行为目标的，在此基础上通过有效管理各种控制设施达到与用电终端互相协调的效果。智能电网体系包括以下三个方面：由硬件基础设施组成的实时监视与控制系统；提高电网系统管理效率的实时优化模型；智能电网通讯系统。

随着用户端智能仪表的开发与应用，用户个体就可以实现负荷分配的实时主动控制。然而智能电网不仅实现个体负荷量的自主控制，更需要实现对所有分布式电网支线的充分监测，对电网设备进行优化控制与相互协调，以达到系统整体性能的优化。

近年来，分布式发电和微网成为了今后智能电网建设的一种发展趋势，因此如何有效的获取各个分布式区域的电网信息，并对各个分布式区域之间进行优化与协调控制成为了一个亟待解决的难点。在这种背景下，本文提出一种由分布式同步测量系统、分布式状态估计中心、调度控制中心构成的智能电网体系结构，其物理结构如图 1 所示。

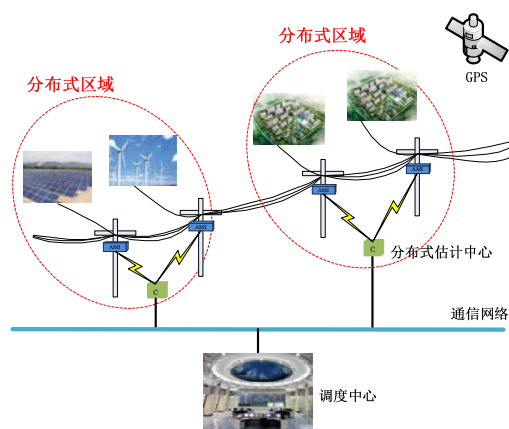


图 1 智能电网体系物理结构

本文提取的分布式同步测量系统，主要用于实现对电网整体结构的可视性和用户端分布式支线的有效监测。该系统采用于无线通讯技术与 GPS 定位对时功能，实现电压电流的同步测量与远距离无线传输。这种基于 GPS 同步测量装置硬件构成如图 2 所示，主要包括电压与电流传感器、GPS 模块、微

处理器、无线通讯模块。其中电压、电流传感器可以实现对电源波形的幅值与相角的测量；GPS 接收器不仅可以用于获取装置的精确位置，而且还能保证状态电网各个装置设备之间的时钟同步；无线通信模块可以远方的调度中心与该测量装置之间的双向通讯。微处理器属于整个装置的控制单元，可以合并电压信号、电流信号、位置信号和时钟信号，然后通过无线传输技术发送给该装置所属于的分布式估计中心。智能电网体系要具有安全、高速的数字化通讯系统。

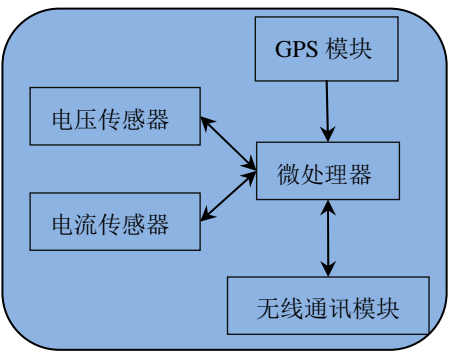


图 2 基于 3G+GPS 同步测量装置结构图

由于子站的状态估计模块的位置可以随着电网的结构方式进行合理的分布，所以分布式测量系统与分布式状态估计中心的无线通讯距离较短，通讯过程造成的延时不会影响到系统的实际运行效果，同时数字量传输防止了数据的失真现象。这种点对点的高效无线数据传输提高了系统的传输的效率及稳定性。

分布式状态评估中心是本文所提的智能电网体系结构中的另一个重要组成部分，主要通过收集分布式测量系统的数据，然后对所属的分布式区域的电网运行工作状态进行估计。由于 GPS 定位系统的同步性，状态评估过程也具有很强的实时性。实时状态评估结果能够综合反映电网运行时的全部状态，其评估结果发送到调度中心的分布式管理系统。

调度中心的分布管理系统，能过收集各分布式区域的状态评估结果，并对整个电网模型和状态进行综合预测估计；然后电网的优化控制算法，根据估计的状态结果，计算得到相应的调整策略，并产生实时控制信号发送到各个可控设备，如图 3 所示。

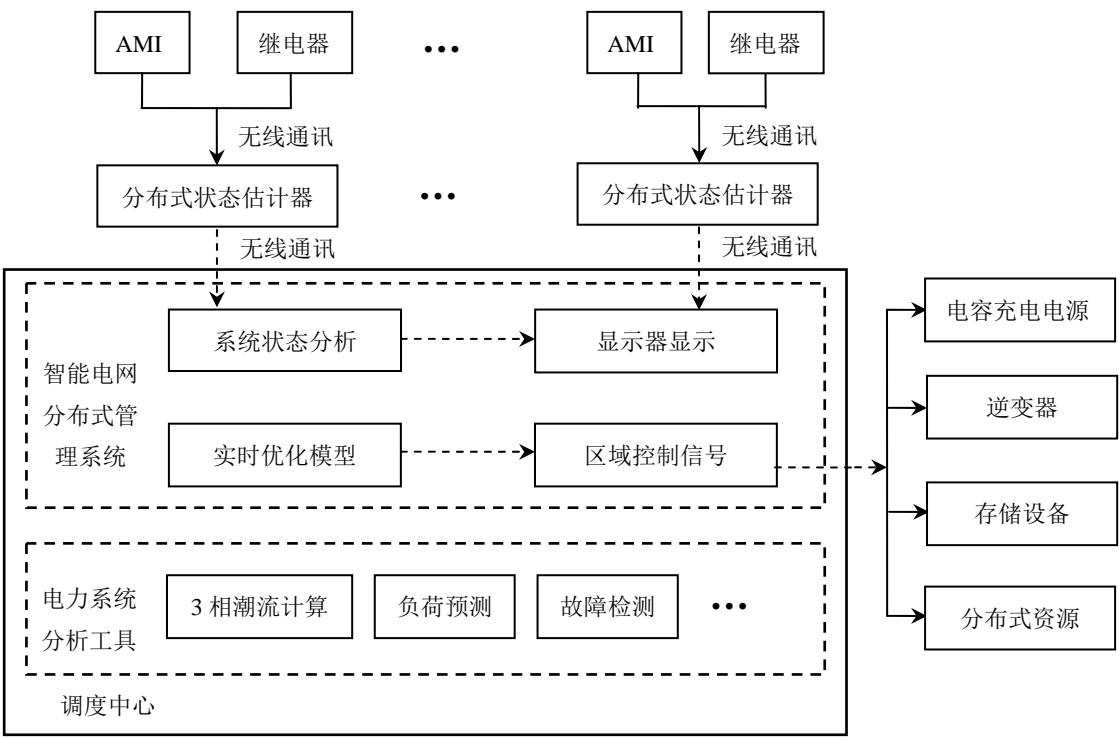


图 3 智能电网体系结构

2 智能电网的状态估计

从上节中描述的智能电网体系结构中看出，要实现对整个网络的高效管理，首先就要应用先进的

另外，智能电网在对整体进行操作和控制时，必然会导致网络拓扑结构发生频繁的变化。因此状态估计过程要能够自动检测系统的变化情况，并根据网络拓扑结构的变化进行相应的参数调整，使电网达到最合理的运行状态。下面针对本文提出的智能电网体系结构，着重介绍的分布式自主状态估计的组成和功能。

2.1 参数类型

自主状态估计的实现是基于智能电网中硬件设备组件的三类关键数据，它们分别是：1) 节点数据；2) 设备模型；3) 测量数据。具体描述如下：

1) 节点数据

智能电网硬件设备组件通过连接点的方式互相连接，节点数据的功能就是用于确定电网的拓扑结构。

2) 设备模型

状态估计的目的是获得系统模型的最佳估计数据，因此，每个设备模型需要随着测量数据的改变自动生成测量模型 $h(x)$ 。

除此之外，电力系统中过高的单相负荷会使电网产生不平衡和不对称的影响。因此，电网在建模的过程中就需要硬件设备的详细模型参数。

标准的设备模型的表示形式如下所示：其中， I 为电流向量， A 为导纳矩阵， V 为电压状态向量， $y(t)$ 为内部状态向量， t 为测量的时间， $b(t-h)$ 为过去的测量值， h 为两次测量之间的时间间隔， $f(t)$ 为二阶非线性向量， q 为二次常数。

$$\begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ b(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix},$$

$$f(t) = \begin{bmatrix} M \\ [V \quad y(t)]q_i \\ M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

3) 测量数据

测量数据包括电压、电流及其它物理量。测量模型 $h(x)$ 为一个特定的系统状态下 x 的模型函数，具体形式如下所示：

$$z_k = c_k + \sum_i a_{k,i} \cdot x_i + \sum_{i,j} b_{k,i,j} \cdot x_i \cdot x_j + \eta_k \quad (2)$$

其中， z_k 为测量值， c_k 为常数项， $a_{k,i}$ 为线性系数， $b_{k,i,j}$ 为非线性系数， η_k 为测量误差，该测量模型为通用模型。

2.2 状态估计算法

状态估计一般可以转化成一个优化问题，即定义一个目标函数，求使该目标函数最小的那组状态向量。一般这种优化问题都可以基于加权最小二乘法进行求解。目标函数可以被描述为：

$$\text{Minimize } J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad (3)$$

其中， W 为是对角矩阵，其非零项为测量误差的逆，方程的解为：

$$\hat{x}^{j+1} = \hat{x}^j + (H^T W H)^{-1} H^T W (z - h(\hat{x}^j)) \quad (4)$$

其中， \hat{x} 为状态的最佳估计结果， H 为测量模型 $h(x)$ 的雅克比矩阵。

2.3 状态估计结果验证

采用卡方检验方法来验证模型的拟合精度及误差的分布情况是否在限定的范围内。求解公式如下：

$$P[\chi^2 \geq \zeta] = 1 - P[\chi^2 \leq \zeta] = 1 - P(\zeta, \nu) \quad (5)$$

其中， ν 为自由度， ζ 为卡方临界值，它们的求解式如下：

$$\nu = m - n, \quad \zeta = \sum_{i=1}^m \left(\frac{h_i(\hat{x}) - z_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (6)$$

其中， m 为测量次数， n 为状态个数， \hat{x} 最佳估计状态。

如果置信水平是在允许的范围内，那么解的准确性就可以利用协方差矩阵评价：

$$C_x = E[(\hat{x} - \bar{x})(\hat{x} - \bar{x})^T] = (H^T W H)^{-1} \quad (7)$$

其中， \bar{x} 为真实值， \hat{x} 为估计值。

每个状态标准的计算方法为：

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{C_x(i,i)} \quad (8)$$

其中， $C_x(i,i)$ 为 C_x 的第 i 个对角线元素。

测量结果的估计值为：

$$\hat{b} = h(\hat{x}, \hat{y}) \quad (9)$$

协方差矩阵的测量估计值为：

$$\text{Cov}(\hat{b}) = H(H^T W H)^{-1} H^T \quad (10)$$

如果卡方检验结果概率非常低，就表明有失效数据的存在，检验识别失效数据并将其剔除。由于状态估计仅能用于系统的某些部分，因此其效率是较高的。

2.4 状态估计算法流程

智能电网系统在启动状态估计模块之后，该算法就按照一定的流程对电网进行实时状态估计。图

4 描述了智能电网状态估计的算法流程。首先, 系统采集各节点数据以及设备模型数据和测量数据; 然后, 建立测量模型 $h(x)$, 进行自主状态估计, 进行故障数据的检测、识别与处理工作; 最后, 将状态估计结果应用到智能电网优化与控制中。状态估计过程可以根据操作人员设定的时间间隔连续地进行, 状态估计结果被打包成一个数据包进行智能电网的通讯网络中进行传输。

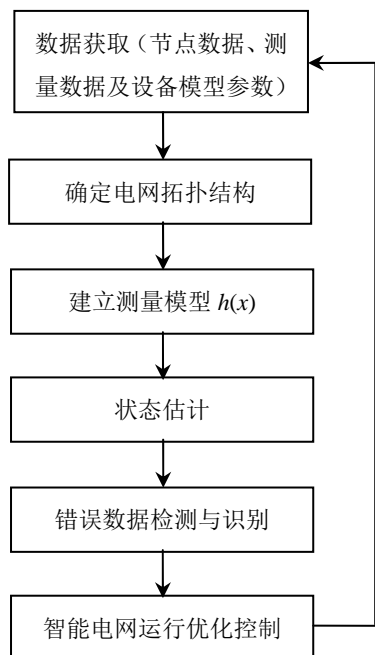


图 4 状态估计算法流程

2.5 状态估计的可扩展性

智能电网的自主状态估计模块要具有良好的可扩展性, 使之能够适用于任意不同的系统。自主状态估计模块负责处理电网中一个具体的局部器件, 各个子模块把状态估计结果传送到分布式管理中心进行整合, 得到整个系统状态估计, 实现对整个分布式电网的实时监控。这种分布式的状态估计体系结构, 能够防止局部状态估计过程负荷过高而导致的处理速度变慢的问题, 当电网规模扩大时, 也能够具有较高的状态估计性能。

3 功能实现

针对前面提出的一种智能电网的体系系统, 本节将主要介绍在这种体系结构下, 如何实现故障检测、负荷平衡、网损最小、供电可靠等目标。

3.1 线路故障检测

电网线路故障不仅能够造成电能供应的中断,

有时还会造成人员伤亡。智能电网的重要功能之一, 就是为线路故障的有效诊断和处理提供相关的措施^[5]。线路故障的形成可能是多种原因造成的, 自然和人为因素都可以导致电网线路发生故障。

对这种线路故障进行精确地查找, 需要花费大量的时间和人力资源, 并且也不是非常的安全和高效。文献[6]中所提到的一种特殊继电器, 可以用于检测电网中的断线故障。但是这项技术在具体的实施过程中价格较昂贵, 且实现起来也较困难。智能电网的出现不仅可以替代原有的配电自动化系统, 在检测和诊断电网线路故障方面具有丰富的资源优势。除此之外, 它还能够提供非常高的检测准确率, 并给出相应的解决方案。

智能电网针对线路故障检测和诊断技术的具体实现, 就是对电网系统的运行状态进行不断地检测更新^[7], 并对每个节点的电压和电流值进行实时计算。当一段线路发生故障时, 该线路节点上靠近电源侧的电压值仍然较高, 电流值却变得很低, 而靠近负荷侧的节点电流值接近于零, 电压值也不正常。电网实时状态估计模块得出该段线路测量结果不正常, 智能电网系统就会根据状态估计模块提供的结果, 并结合GPS定位装置和通信装置, 来确定线路故障发生的准确位置, 调度中心就会发送控制命令, 将距离故障位置最近的保护装置进行跳闸动作。

3.2 负荷平衡

智能电网体系在实现电力负荷平衡分配时, 一定要以不影响电能用户的正常用电为前提。电网负荷平衡的目的就是要解决高峰负荷与低峰负荷交错出现, 给电网带来的较高运营和维护费用问题^[8]。因为在高峰负荷时, 电网传输电能的过程中能源损失现象较严重, 负荷平衡就能减少能源的浪费。通过对负荷的合理优化设置, 可以同时达到负荷最小及网损最小的目的。

因为负荷平衡问题不能在电网运行时不断地试验, 智能电网系统为了实现负荷平衡, 就要具有仿真系统来连续精确地模拟电网的运行状态, 通过大量的模拟试验来得到最终的负荷平衡方案。基于仿真系统的电网信息, 负荷平衡问题可以转化为优化问题, 从而实现对资源和设备的直接控制。电网系统中的负荷运行具有一些统计特征, 我们将一天的时间平均分为几个小的时间段 t_1, t_2, \dots, t_n , 并假设每个时间段的负荷是相等的, 得到优化问题 $\min X^*$

的具体形式如下：

$$\begin{aligned}
 & X^* > \text{Re}(\mathcal{V}_1^0(t_1) \cdot \mathcal{P}_1^0(t_1)) \\
 & \quad \quad \quad \text{M} \\
 & X^* > \text{Re}(\mathcal{V}_1^0(t_n) \cdot \mathcal{P}_1^0(t_n)) \\
 \text{s.t. } & g(x(t_1), u(t_1), L(t_1)) = 0 \\
 & \quad \quad \quad \text{M} \\
 & g(x(t_n), u(t_n), L(t_n)) = 0 \\
 & h(x, u) \geq 0 \\
 & u_{i,\min} \leq u_i \leq u_{i,\max}
 \end{aligned} \tag{11}$$

其中， $h(x, u)$ 为约束条件， u_i 控制量的约束。

其目的就是减少高峰负荷，因此通过减少每个小的时间段内的最大负荷就可以达到减少一天内的高峰负荷。约束方程为：

$$g(x(t_k), u(t_k), L(t_k)) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \tag{12}$$

该方程代表电网系统每个时间段里的电能流向，其中向量 $x(t_k)$ ， $u(t_k)$ 和 $L(t_k)$ 分别为状态变量、控制变量和统计负载。

上述针对负荷平衡问题的优化解决方案，能够实现对系统中的每个可用负荷与资源进行有效的控制。这种优化方式比现在普遍使用的将用电量和价格发送给电能用户，以费用的方式来控制用户的负荷更加有效。因为，用电量和由此付出的价格只能起到转移高峰负荷的效果，没有从根本上达到平衡整个电网负荷的目的。

3.3 网损最小化

智能电网要能够在保证电网安全高效运行的情况下，使供电网络的损耗达到最小。该项功能在具体的实现上，需要通过一种可以对电压和无功功率进行控制的设备体系，使之能够与现有的分布式电网结构相结合。这种方案在具体的实现上是可行的，因为目前的变频器能够经过具有四象限处理能力的滤波装置连接到电力网络，从而使电网具有吸收或注入无功功率的动态调节能力，并与协调线路电压和无功控制的方案相结合，达到网损最小化的目的。

针对智能电网的体系结构，要想实现对电能终端用户有效供电的同时将网损降低到最小的目标，可以采用三相状态估计方法来实现。该方法是利用分布式同步测量装置和电能用户端非同步测量获得的电网实时数据，并结合 SCADA 系统提供的数据，来对电网干线实施高度精确的监控。智能电网中所应用的方法对比传统的单相状态估计方法，不仅能够获取负荷不平衡而导致的网损，还能够对网

损的具体消耗环节进行有效的捕获，从而缩小产生网损的区域，达到有针对性的减小网损的目的。

网损最小化问题的求解可以转化为如下所示的优化问题 $\min f(x)$ ：

$$\begin{aligned}
 \text{s.t. } & g(x, u) = 0 \\
 & h(x, u) \geq 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$u(i, \min) \leq u_i \leq u_{i, \max}$$

其中， x 为状态变量， u 为控制变量。

总的电网损失可以用系统的状态表示，例如，节点电压值的求解如下式所示：

$$\begin{aligned}
 f(x) = \sum_{\text{circuit}} \sum_{\text{phase}} \text{Re} \{ & (\mathcal{V}_{i, \text{phase}}^0 \cdot \mathcal{P}_{i, \text{phase}}^0 \\
 & + \mathcal{V}_{j, \text{phase}}^0 \cdot \mathcal{P}_{j, \text{phase}}^0) \}
 \end{aligned} \tag{14}$$

其中， i, j 代表连接到干线上不同电力线路。

3.4 供电可靠性

智能电网的另一个重要应用就是提高供电可靠性。由于智能电网体系可以准确地监控电网的实时运行状态，还能够快速地诊断出电网的故障区域，在此基础上提高电网的可靠性就变得非常简单又易于实现^[9]。总体来说，智能电网在提高供电可靠性上，就是根据故障发生的区域以及开关和断路器的状态，来得到电网的最佳重构方式，达到将故障区域降到最小，同时最大限度地恢复用户用电，并尽快派出检修人员对故障区域进行恢复。电网的可靠性增强问题，即电网最优重构问题可以用下述公式来描述：

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{k \in \Omega} S_{Lk} \\
 \text{s.t. } & F(V, P_G, Q_G) = 0 \\
 & V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \\
 & P_{Gk}^{\min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk}^{\max} \\
 & Q_{Gk}^{\min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk}^{\max} \\
 & |I_{ij}| \leq I_{ij}^{\max}, ij \in \Omega
 \end{aligned} \tag{15}$$

其中， F 为故障区域的功率约束， S_{Lk} 为干线上的负载， V_k 为干线 k 上的电压量， P_{Gk} 为干线 k 上原有产生的总功率， Q_{Gk} 为干线 k 的消耗总功率， I_{ij} 为干线 i 与 j 之间的电流， Ω 为故障区域的干线集合。

该优化问题要实现的目标是：最大限度地减少连接到故障区域的负载数目，以提高电网的可靠性。因此，目标函数的约束条件就包括以下三个方面：1) 干线的电压约束；2) 故障区域的总功率约束；3) 线路负载约束。优化问题的目标函数求解结果，能

够为系统提供最小的停电区域和最佳的电网重构方式。

4 结论

本文主要描述了智能电网在电力系统中改造和建设的体系结构, 以及其功能定位的详细内容。智能电网基础设施建设的最主要目标, 就是减少电网的运行成本、提高供电的可靠性。本文提出的这种智能电网体系, 结合先进的状态实时估计算法来提高电网整体自动化水平, 实现了电力系统准确地实时监测与控制, 该方案对我国智能电网的建设与实施也具有一定的现实参考意义。

参考文献:

- [1] 马韬韬, 郭创新, 曹一家, 等. 电网智能调度自动化系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (9): 7-10.
- [2] 林宇峰, 钟金, 吴复立. 智能电网技术体系探讨[J]. 电网技术, 2009, 33 (12): 8-14.
- [3] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 124.

- [4] 宋永华, 孙静. 未来欧洲的电网发展与电网技术[J]. 电力技术经济, 2008, 20(5): 126.
- [5] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 126.
- [6] A. Westrom, A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, etc. Open conductor detector system[J]. *IEEE Transaction, Power De*, 1992, 3 (7): 1643-1651.
- [7] 张钦, 王锡凡, 付敏等. 需求响应视角下的智能电网[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 19-55.
- [8] 蔡声霞, 王守相, 王成山, 等. 智能电网的经济学视角思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 13-16, 87.
- [9] 王明俊. 自愈电网与分布式电源[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 1-7.

作者简介:

廖环宇 (1985-), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事 DCS 控制系统, 智能电网等方法的研究。