

现代电力调度控制中心的革新 ——由 EMS 走向 AEMS

何光宇^{①*}, 孙英云^①, 阮前途^②, 王伟^②, 董树锋^①

① 清华大学电机系, 电力系统国家重点实验室, 北京 100084;

② 上海市电力公司, 上海 200122

* E-mail: gyhe@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-06-19; 接受日期: 2008-07-08

国家自然科学基金(批准号: 50595411, 50377018)和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2004CB217903)资助项目

摘要 分析揭示了现有(常规)电力系统的能量管理系统(EMS)功能与作用的局限性. 对电力混成控制理论作了简明阐释. 该理论是建立先进能量管理系统(AEMS)的基础, 而 AEMS 的实施可实现电力系统多重目标趋优自动闭环调控. 进一步论述了在调度控制中心实现由 EMS 到 AEMS 的跨越是电力调度与控制领域的一场重大革新. 并指出 EMS 可看作是 AEMS 的有机组成, 从而可在最大限度利用现有调度自动化资源的条件下, 实现电力系统趋优闭环运行的 AEMS.

关键词

混成自动控制
多重目标趋优化
先进能量管理系统
事件驱动

现代电力系统结构复杂而庞大, 其所含元件数以十万计, 且电网覆盖地理区域辽阔, 加之电能不能大量贮存等特点, 如何控制与管理现代电力系统, 使之安全、优质和经济的运行, 是一个意义十分重大而艰巨的课题.

能量管理系统^[1](energy management system, EMS)是电网调度自动化的监控中心, 目前各主流 EMS 产品均于 20 世纪 90 年代左右开发完成, 受限于当时的计算机技术以及电力控制理论水平, 其功能主要是帮助调度人员监视和分析电网的运行状况, 而对电网运行方式调整和控制仍主要靠调度员来完成, 远未做到真正意义上的实时自闭环调控.

随着经济水平的不断提高和电力系统规模及复杂程度的不断扩大, 仅靠调度员人工调整, 已越来越不能满足现代电网运行中对安全性、经济性和运行质量等多目标趋优控制的要求. 在这一重大需求驱动下, 先进的 EMS(advanced EMS, AEMS)^[2,3]应运而生. 该系

统是新由我国电力工作者自主开发、拥有完全自主知识产权的电网调度自动化系统, 可协调地自动调控网内所有可控资源, 以实现电网多目标趋优闭环运行.

近年来, 世界各主要电力系统发生的大规模停电^[4,5]事故表明, 电网管理及控制理论和技术的发展, 特别是电力调度自动化水平, 还远落后于电网本身规模和复杂程度的增加. 因此研究和发展新一代的电网控制管理技术, 以实现电网安全、经济和优质的运行, 由 EMS 走向 AEMS, 实现电网调度控制中心的科技革新, 已成当务之急.

本文先对 EMS 的局限性进行分析和评述, 然后着重阐述 AEMS 解决电网全局最优运行问题的理论与方法; 进而指明由 EMS 走向 AEMS 的重要理论和实践意义及其具体途径.

1 现有 EMS 的局限性

实现电力系统的安全、优质、经济运行一直是电

力工作者的梦想。但现有的能量管理系统^[1], 只包括基本的电网安全和经济运行的分析功能, 如状态估计、外部等值、负荷预报、在线潮流、安全分析、故障分析、最优潮流(OPF)等。也就是说, 常规 EMS 所起的作用, 主要是电网运行情况的监视和分析, 而电网运行方式的实时调节与控制, 还主要依靠调度员人工进行。这样, 电网运行状态调控实时性难以保证, 更谈不上安全、优质和经济三重目标综合优化运行。我们知道, 要保证电网的安全、优质和经济运行, 需要同时处理网损极小化、发电费用最小化、电压质量、频率质量、电压稳定性、频率稳定性、同步稳定性(大干扰稳定性)等问题。从数学上看, 这是一个具有特高维、非线性、微分方程-代数方程-不等式约束的条件变分问题, 该问题的数学描述如下

$$\min J(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \int_0^{\infty} \sum_{i=1}^n q_i F_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dt,$$

$$\text{s.t. } \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}),$$

$$0 = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \mathbf{y}),$$

$$\zeta < \Delta f < \xi,$$

$$\alpha < \Delta V < \beta,$$

此处, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ 分别为电力系统的状态向量和输出向量, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ 为控制向量; Δf_i , ΔV_i 分别为第 i 节点的频率和电压的动态偏差。在有限时间内(如 10 s)求得上述优化问题的解析解几乎是不可能的。这可能是现有的 EMS 系统主要只用于分析却未能用于全局控制的缘由。

除了以上原因外, 将现有 EMS 用于电网在线控制还存在下列难以克服的困难。

1) 理论上, 若实现电网有功和无功的协同控制, 可实现最优潮流的在线运行。但现有 EMS 系统中, 最优潮流收敛性和计算速度还不能达到要求。

2) 电网是分级分层结构, 要实现电网全局最优运行, 各控制中心之间需要进行电网模型交互, 在现有 EMS 系统上实现这一点较为困难。

2 AEMS 可实现电网全局趋优运行

由上节可知, 要实现电网全局最优运行, 难以使用纯数学的方法来解决, 需要的是创新的思路。

解决此问题的新途径就是由我国电力工作者自

主提出的电力混成控制理论^[6,7,2]。基于这一思想构建的 AEMS, 可实现电网的全局趋优运行, 从而在实践上解决大电网的多重目标趋优控制问题。下文先介绍电力混成自动控制理论, 然后说明 AEMS 中如何利用该理论来实现电网全局趋优运行。

2.1 电力混成控制理论简论

2.1.1 电力混成控制简论 电力系统混成控制理论主导思想可用图 1 加以说明。图 1 中, $X_S(T)$ 为 T 时刻满意状态集合空间, 即多目标趋优状态集合空间; $X_{\bar{S}}(T)$ 为 T 时刻不满意状态集合空间; $X_A(T)$ 为 T 时刻全状态集合空间。当系统 T 时刻运行状态点一旦进入 $X_{\bar{S}}(T)$ 集合空间, 即触发产生事件 E (event), 并由事件 E 生成相应的控制策略, 以使系统运行状态点回归到满意状态集合 $X_S(T)$ 中, 则在一定程度上实现了电力系统多目标优化运行。这也正是电力混成控制理论主导思想: 将一切不满足要求和不满意的状态都分类地定义为事件, 通过控制使得系统回归至无事件运行状态, 则系统的各项指标(稳定性、电能质量和经济性)一定是足够满意的。

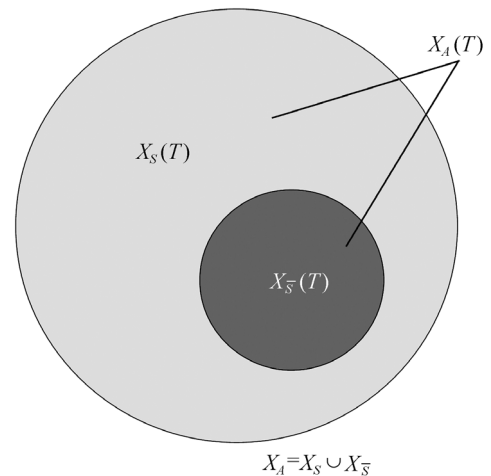


图 1 全状态 X_A =满意状态集合 X_S 与不满意状态集合 $X_{\bar{S}}$ 的并集

基于这一思想构建的先进能量管理系统(AEMS), 就可与实践上解决大电网的多重目标趋优控制问题, 以实现电力工作者多年追寻的目标, 决定性地提高电网安全电能质量稳定性和经济运行水平。

2.1.2 电力混成控制理论的运行架构 电力混成控制理论的运行架构可由图 2 所示的 3 层结构来描述。

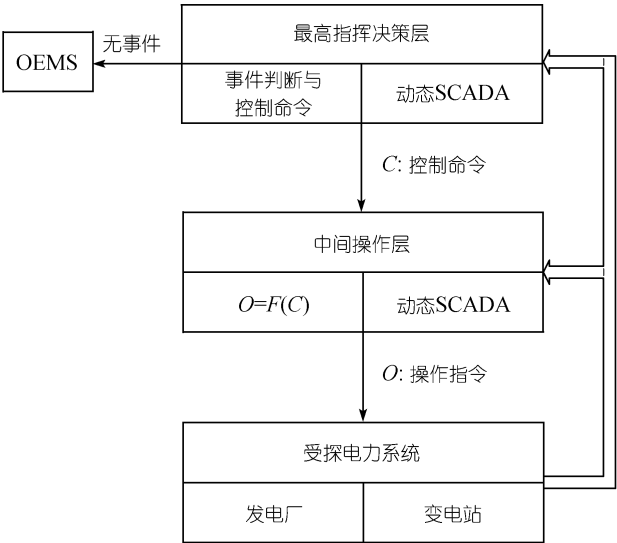


图 2 电力混成控制系统的运行架构

- 1) 最高决策指挥层. 接收底层动态电力系统监测到的各关键节点状态数据, 进行数据处理, 然后根据对事件类型的定义由分析功能模块判断是否形成“事件”及事件类型, 据此下达相应的控制命令 C (control command)以驱动中间层;
- 2) 中间处理与操作层. 接受上层下达控制指令 C 后, 综合考虑受控电力系统内部各种控制设备的运行情况, 生成相应的合理操作指令 O (operation order), 并将指令下达给底层的受控装置;
- 3) 底层. 发电厂、变电站以及 SVC 和各种 FACTS 装置, 除已具有的自身数字型的闭环控制器外, 增设混成控制指令接受和执行装置, 以保障中间层下发的操作命令的执行.

图 2 所示意的调度混成控制系统, 使得自始以来人们关于电力系统多目标趋优的理想找到了一种可以工程化实现的方法.

2.1.3 电力混成控制理论的几何表达 电力混成控制理论的几何表达如图3所示. 图 3 中, E 为事件空间(event space), C 表示控制命令空间(control command space),

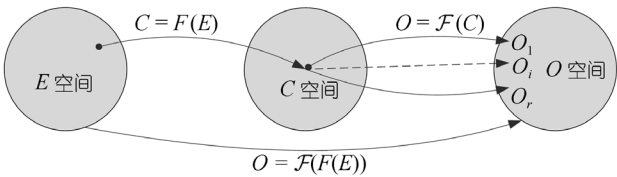


图 3 事件集合与操作指令集合映射关系示意图

O 表示操作指令空间(operation order space), F 和 $\mathcal{F}$ 表示相应的映射规则.

图 3 表明, 从事件空间 E 到操作指令空间 O 是一个单点-多点复合映射, 这就从本质上揭示了混成控制系统“事件驱动”的特征. 相对于控制论中已有的“时间基”(time base), 可将其称为“事件基”(event base).

2.1.4 电力混成控制理论的代数表达 电力混成控制理论也可用以下的集合论语言进行描述:

$$E = \mathcal{E}(D), \tag{1}$$
$$C = F(E), \tag{2}$$
$$O = \mathcal{F}(C), \tag{3}$$
$$O = \mathcal{F}(F(E)), \tag{4}$$
$$\dot{x} = f(x, O_i), \tag{5}$$
$$A(O) \rightarrow E \subseteq \emptyset. \tag{6}$$

(1)式中, E 为事件集合(Event Set), D 为电网实测到的运行数据, $\mathcal{E}$ 为由 D 是否形成 E 的逻辑判断, 即 D 到事件集合 E 的一个逻辑函数.

(2)式中, F 为由事件 E 转化为控制命令的逻辑函数, 即用来判断事件类型并将其转换为相应的控制命令.

(3)式中, $\mathcal{F}$ 为由命令转化为操作指令的逻辑函数, 这是一个由控制命令集 C 到操作指令集 O 的点到集的转换.

(4)式可由将(2)式代入(3)式中得到, 它表明操作指令集合 O 是事件集合 E 的一个复合逻辑函数(见图 3).

(5)式中, x 表示受控电力系统的状态变量, O 表示作用于其上的操作指令. 由(5)式可知: 整个电力系统的状态 x 可以通过时间离散的操作指令 O 加以改变.

(6)式可读作: 操作指令 O 作用的结果是使事件集合 E 成为空集.

若(6)式成立, 则表明此时的电力系统运行在满意的状态(多重目标趋优状态). (6)式实际上就是事件驱动控制所需要达到的目标, 实现了(6)式的同时就意味着实现了系统的多目标趋优化运行.

由上可见, 系统始终处于事件的发现、处理和消除过程中, 因此我们说事件驱动是电力混成控制理论的精髓.

2.2 AEMS 基于电力混成控制理论以实现电网全局趋优

如上所述, 电力系统所有满意的运行点(状态)是一个集合, 本文中称其为多目标趋优化运行域. 系统最优运行点就应该位于这个域内. 电力系统控制的最高目标是保证系统在最优运行点运行, 但由于电力系统是一个负荷和运行情况不断变化的动态系统, 对于这样一个复杂巨系统来说, 随时调整到最优运行点既不必要也不可能, 同时对发电机组调整过多也必然会影响发电机组的使用寿命和经济性. 因此, 混成控制的结果若能使系统运行点位于其最优运行点的一个足够小的邻域内, 即可认为系统处于令人满意的运行状态. 图 4 为多目标趋优化运行域在二维空间的投影示意图. 基于这一理念, 当系统实际运行点或预测运行轨迹超出域的边界时, 则触发相应的事件, 并及时生成相应控制策略来消除这一事件. 其组成框架如图 5 所示.

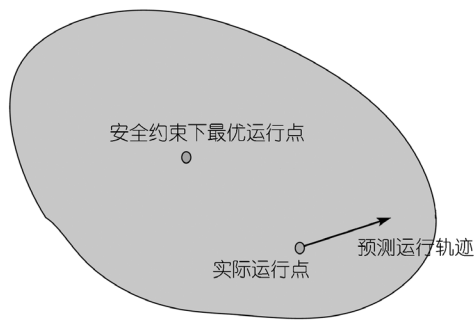


图 4 多目标趋优化运行区域在二维空间的投影示意图

由前所述可知, “事件驱动”是电力混成控制系统的精髓. 基于这一思想开发的 AEMS 系统^[3], 相应地包括有事件分析系统、事件处理系统和调度员决策系统 3 部分(图 5), 其中:

- 1) 事件分析系统负责对所收集到的信息进行实时分析, 判断有无事件产生, 若有则将事件发送给事件处理系统;
- 2) 事件处理系统对接收到的事件进行处理, 产生相应的控制命令进而产生相应的操作指令下达给下级的 AEMS 系统或由其直控的底层设备.

在一般状况下, 事件分析系统和事件处理系统已能有效的进行电网运行趋优闭环控制. 但鉴于调度人员需要对其所调管的电力系统运行状态有很好

的“知情度”和“掌控权”, AEMS 还设有调度员决策系统, 负责:

- 1) 将系统运行的关键状态以可视化的形式提交给调度员, 使调度员对系统的运行状况有直观的了解;
- 2) 便于调度员进行运行时的调度决策和维护时的配置管理.

图 5 中所述事件分析系统、事件处理系统及调度员决策系统等详细描述请参见文献[2].

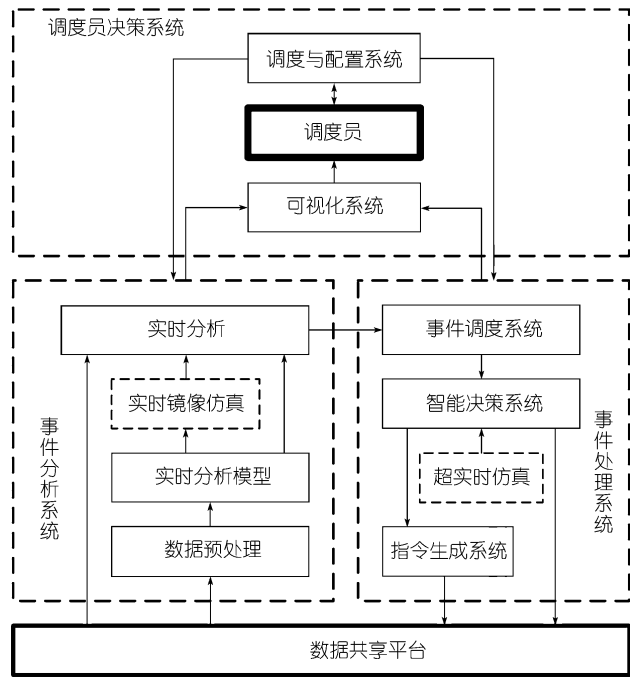


图 5 AEMS 的组成框架

另外, 由上节可知, 为实现电网趋优闭环控制, 还需解决最优潮流在线控制和控制中心间电网模型交互问题. 所幸, 随着科学技术发展, 这 2 个问题已有了较为完善的解决方案.

最优潮流在线运行问题. 现代内点法的发展, 已使最优潮流求解问题得到了满意的解决, 其收敛性和计算速度都可得到保证^[7-9]. 在已实现的某 AEMS 系统中, 最优潮流在可行情况下总能收敛, 且计算时间小于 1 s, 满足在线运行需要.

控制中心间电网模型交互问题. 关于控制中心间电网模型交互, 国际电工委员会提出了 IEC 61970 标准^[10]. 基于 IEC 61970 CIM/CIS 标准, 控制中心间模型交互变得简单易行. 事实上, 在某实际运行的 AEMS 系统中, AEMS 与 EMS 之间电网模型交互, 也

是基于这一标准进行的。

3 由 EMS 走向 AEMS 的意义

由 EMS 走向 AEMS, 可在电网全局分析基础上, 实现电网全局趋优闭环控制, 这一跨越对于现代电网的发展具有极其重要的意义, 原因如下。

AEMS 系统的实施能够在电力系统调度自动化领域实现真正意义上的自动闭环控制, 这无疑是具有决定意义的科技进步, 其效果是可最大限度地改善电网运行的安全性、经济性和电能质量。并且, AEMS 的实施还能有效消除由于调度人员的频繁紧张劳作而可能导致的不当操作所引发事故。

总之, 实现 AEMS 就可能将整个大型电力系统控制得如同一台“智能广域机器人(smart wide area robot, S-WAR)”一般, 这不能不说是电力系统调度领域的一场大革命。

4 由 EMS 建设 AEMS 方法

如前所述, EMS 侧重于电网全局分析, AEMS 则在全局实时分析基础上实现电网全局趋优闭环控制。

由于全局分析是实现全局趋优闭环控制的前提, 因而常规 EMS 也是实现 AEMS 的一个组成部分。改进后的 EMS(特别是在状态估计和优化潮流方面的改进)更可以看作是 AEMS 的有机组成部分, 负责完成全局分析功能, 故可在现有 EMS 基础上建设 AEMS。在现有 EMS 基础上建设 AEMS, 不仅可以最大限度保护现有资产, 还可加速 AEMS 建设, 保证电网分析到控制方式的平稳过渡。

值得指出的是, 在现有 EMS 系统中, 由于其全局分析功能仅在调度员需要时才进行调用, 使用频率不高, 对模块收敛性、合格率、准确率、运行稳定性要求相对较低; 而在 AEMS 中, 由于全局分析所得结果将用于全局趋优闭环控制, 并且需要不间断连续运行, 故对分析模块(如状态估计、最优潮流、超短期负荷预报与节点负荷预报)的收敛性、合格率、准确率、运行稳定性等的要求都有质的提高。若已有的 EMS 分析模块不能满足 AEMS 实时闭环运行要求, 应在 AEMS 中建立相应模块予以更新和辅成。

图 6 描述了已实现的某 AEMS 系统中, AEMS 与

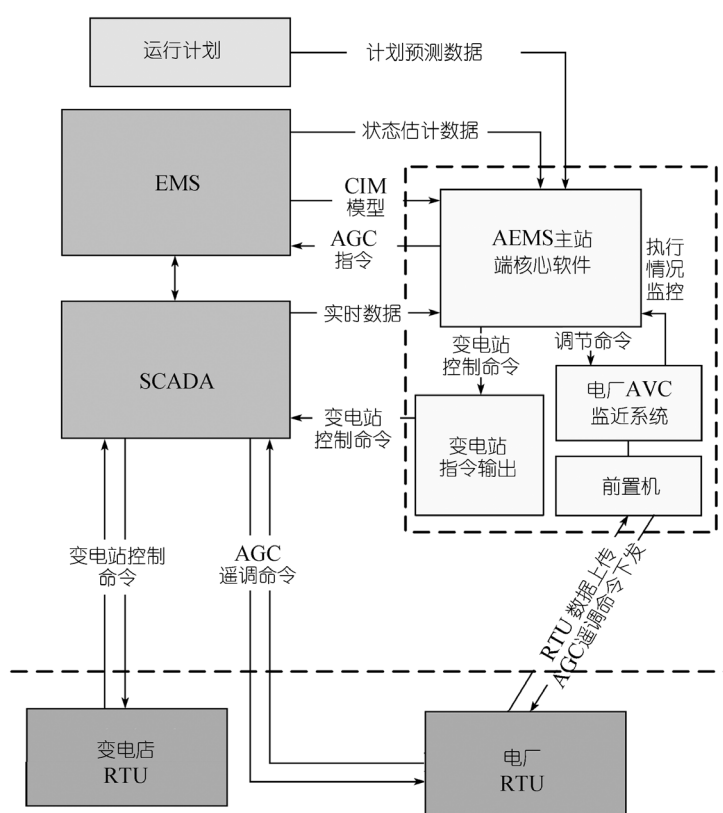


图 6 某实际 AEMS 系统概览

EMS/SCADA之间的关系. 为充分利用已有投资, 在该系统中, AEMS 需要的 SCADA 数据、状态估计结果和电网模型数据(基于 CIM 标准)都可从现有的 EMS/SCADA 系统获得; 同时, AEMS 形成的针对发电厂的 AGC 控制指令和变电站控制指令, 也可通过现有的 EMS/SCADA 系统下发. 由于该 EMS 系统中, 尚未实现 AVC 功能, 因此在该 AEMS 系统中, 新建了“电厂 AVC 监控系统”和“前置机”子系统, 用于电厂电压遥调指令下发.

5 结论

1) 由于电力系统多目标最优控制问题在数学上是一个具有特高维微分-代数方程和不等式约束的条件变分问题, 无解析解, 故实现全局最优闭环控制功

能需另辟新途.

2) 本文提出的 AEMS 以电力系统混成自动控制理论为基础, 并应用了现代内点法和 IEC 61970 等新理论新方法和国际通用规约, 实现了电网的全局趋优闭环控制.

3) AEMS 与 EMS 不仅毫无抵触之处, 而且 EMS 所实现的全局分析功能, 可以看作 AEMS 有机组成部分.

4) 由 EMS 走向 AEMS, 不仅保存了现有 EMS 的全部资源和功能, 还可保证电网调度中心实现由分析、监控型向自动闭环控制型的平稳过渡, 从而实现电网安全、经济、优质集成趋优化运行目标, 是迄今电力调度自动化发展过程中的一项具有决定意义的革新.

参考文献

- 1 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统(EMS). 北京: 科学出版社, 1998
- 2 Ruan Q T, He G Y, Mei S W. Advanced EMS and its application to Shanghai Power Grid. In: 2007 Electro/Information Technology Conference. Chicago: IEEE, 2007
- 3 卢强, 何光宇, 梅生伟, 等. AEMS 及其在上海电网试运行. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(3): 476—480
- 4 何大愚. 对于美国西部电力系统 1996 年 7 月 2 日大停电事故的初步认识. 电网技术, 1996, 20(9): 35—39
- 5 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思. 电网技术, 2004, 28(21): 1—5
- 6 胡伟, 卢强. 混成电力控制系统及其应用. 电工技术学报, 2005, 20(2): 11—16
- 7 Hua W, Sasaki H, Kubokawa J, et al. A interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel date structure. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13(3): 870—877
- 8 Hua W, Sasaki H, Kubokawa J, et al. A decoupled solution of hydrothermal optimal power flow problem by means of interior point method and network programming. IEEE Trans Power Syst, 1998, 13(2): 286—293
- 9 孙英云, 何光宇, 梅生伟, 等. 基于变分模型的动态最优潮流新算法. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 16—20
- 10 邓显达, 何光宇, 陈颖, 等. 上海电网基于 JAVA 反射机制的 CIM 模型导入. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 21—25