

# 光伏并网系统 CIM 建模研究



李升\*, 黄钰杰, 孙思允, 朱玉婷

南京工程学院电力工程学院, 江苏南京 211167

**摘要:** 为开展光伏并网系统电压稳定在线监控仿真系统研究, 本文以含有一个可灵活设置容量(包括分布式、较大规模、大规模和超大规模等)的光伏电站的典型3节点电力系统为研究对象, 依据IEC 61970-301公共信息模型(Common Information Model, CIM)标准, 采用Rational Rose软件和统一建模语言(Unified Modeling Language, UML), 研究了光伏并网系统的CIM建模方法, 建立了光伏并网系统网络连接模型、各负荷模型、量测模型及拓扑模型; 同时为简化建模, 将光伏电站作为负荷处理。在建立的光伏并网系统CIM模型基础上, 研究将面向对象的公共信息模型映射到关系型数据库的方法, 建立了实用的数据库映射图, 再运用数据库技术将所建的光伏并网系统CIM模型存入建立的数据库, 供能量管理系统EMS和光伏并网系统电压稳定在线监控等各种应用软件使用。可将数据库与光伏并网系统电压稳定在线监控软件进行技术性连接, 完成厂站端与监控端的通信。

**关键词:** 光伏并网系统; 公共信息模型(CIM); 面向对象建模; 数据库映射; 电压稳定在线监控

**DOI:** [10.57237/j.jest.2023.01.002](https://doi.org/10.57237/j.jest.2023.01.002)

## Study of CIM Modeling for a PV Grid-Connected System

Sheng Li\*, Yujie Huang, Siyun Sun, Yuting Zhu

School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China

**Abstract:** To conduct the research on voltage stability online-monitoring simulation system in the photovoltaic (PV) power grid-connected system, a classic 3-bus power system containing a PV power station with a flexible setting capacity (including distributed PV, relatively large-scale and large-scale PV, and super large-scale PV base, etc.) is taken as the test example. According to the IEC 61970 Standard Part 301 (Common Information Model, CIM), CIM modeling method for the PV grid-connected 3-bus system is studied by using the Rational Rose software and the unified modeling language UML, and the PV grid-connected system's network connection model, each load model, measurement model and topological model are established; meanwhile, the PV power is treated as a load model to simplify the modeling process. On the basis of the established CIM model of the PV grid-connected system, the method of mapping the common information model to the relational database is studied and an applied mapping diagram is set up. Then the database technology is used to deposit the established CIM model into the created database for the use of Energy Manage System (EMS) and each utility software such as the voltage stability online-monitoring software in the PV grid-connected system. Then, the database is technically connected to the voltage stability online-monitoring software of the PV grid-connected system, and the communication between the station terminal and the monitoring terminal can be realized.

基金项目: 江苏省大学生创新创业训练计划重点项目《光伏并网系统保护与稳控协调控制策略研究》(202211276009Z).

\*通信作者: 李升, shengli@njit.edu.cn

收稿日期: 2022-11-26; 接受日期: 2023-01-13; 在线出版日期: 2023-02-03

<http://www.energyscitech.org>

**Keywords:** Photovoltaic (PV) Grid-Connected System; Common Information Model (CIM); Object Oriented Modeling; Database Mapping; Voltage Stability Online-Monitoring

## 1 引言

随着计算机、通信、传感器、人工智能等技术的快速发展，现代电力系统正向着设备自动化、信息数字化和系统智能化的方向发展。能量管理系统（Energy Manage System, EMS），即电网调度自动化系统被广泛运用。EMS 主要搭载于电网调度中心（如网、省、地级调度中心），给电力系统的调度监控人员提供各种实时电网信息，EMS 还评估电网的当前运行状态并自动检测是否需要调度来控制，从而确保电网安全、稳定、经济地运行[1]。

作为可再生能源的主要利用形式之一，太阳能光伏发电发展十分迅速，越来越多的集中式和分布式光伏电站已经建立，光伏并网已成为当前建设新型电力系统的主要趋势。由于受大气温度和光照强度的影响，光伏发电量的不可控制以及光伏出力的随机波动性都给光伏并网系统的运行带来很大的困扰，特别是对系统的电压稳定性产生不利影响[2-4]，因此开发基于 EMS 的光伏并网系统电压稳定监控软件等应用程序具有重要的实用意义。

IEC 61970 是由 IEC TC 57/WG 13 负责制定的 EMS 应用程序接口（EMS-API）系列标准，目前已成为调度主站系统的建模规范及主站之间的模型交互准则[5]。许多学者已对 IEC 61970 标准开展了应用研究，文献[6]基于 IEC 61970 和 IEC 61850 标准提出了电动汽车充电站监控系统建模方案。文献[7]研究了基于 IEC 61970 标准的电网实时拓扑分析共享技术。文献[8]基于 IEC 61970 的公共信息模型（Common Information Model, CIM）标准建立了一次、二次设备信息模型并设计了数据交互模型。文献[9]则扩展应用 IEC 61970 公共信息模型，实现了对热力系统的 CIM 建模。

本文对一个接入光伏电站的经典 3 节点电力系统，应用 IEC 61970 标准的 301 部分（公共信息模型基础）和 Rational Rose 软件进行 CIM 建模，并运用 MySQL 建立关系型数据库，将建立的 CIM 模型映射到该数据库中。通过建立的数据库，光伏并网系统电压稳定监控软件等应用软件可按 IEC 61970 标准规定的接口进行信息调用。

## 2 IEC 61970-301 标准和统一建模语言

IEC 61970 标准的 301 部分定义的是公共信息模型（CIM）基础，这是一个面向对象的可描述电力系统几乎所有模型的标准，它通过规范一些公共的基于对象的类、类的属性、类的关系来描述电力系统资源[10]，并从稳态领域逐步扩展到动态领域[11]。

对于庞大、广域的电力系统，其中的电力设备数不胜数，这些电力设备所包含信息的容量更加巨大，整理归纳打包这些信息就显得尤为重要。CIM 标准提供了一种较为全面且专业的电力系统信息规范，遵循 CIM 标准可以使不同开发商所开发的 EMS 应用，或者多个 EMS 系统之间以及 EMS 系统和其它电力系统信息处理系统之间可以相互兼容数据，相当于提供了一种通用的语言来描述电力系统，可有效解决不同应用系统数据模型不统一的问题。

CIM 是一个抽象模型，表示包含在企业运行中的电力企业的所有主要对象。CIM 主要描述了电力系统设备之间的拓扑关系，以及如何描述电力设备的属性，并且规范了电力系统设备及设备信息的命名，每种电力系统设备或设备的集合对应 CIM 中的一个类。CIM 定义了多种模型包来管理这些类，每一个包都包含一个或多个类图，用框图的方式表示该包中的所有类及它们之间的关系。

IEC 61970-301 标准中给出了 13 个包，其中核心包 Core、电线包 Wires、拓扑包 Topology、负荷模型包 LoadModel 和量测包 Meas 是在描述一个电力系统网络时必须用到的 5 种包。每一个包中所有的类图集合就是该包中的所有的类及它们之间关系的集合。如果该包中的类与其它包中的类存在联系时，那么这些类也必须在该包的类图展示出来，并且也要标明其所属的包的来源。

在 CIM 中，一个类是对电力系统中的某种电力设备或者相关参数模型信息的描述，例如在 EMS 中需要描述系统中的变压器、负荷或电力线路等。当涉及到 EMS 应用中的数据处理，分析模型、量测及计划时，就需用 IEC 61970-301 标准中所规定的表示方式，这种

规范的表示方式遵循了 EMS-API 接口标准的即插即用和集成兼容的要求。

CIM 的对象模型之间关系有 3 种: 继承、关联、聚集。继承描述一个较普遍的类与一个较具体的类之间的关系; 关联描述两个类之间的抽象联系; 聚集则描述整体与部分之间的弱关联关系。

统一建模语言 (Unified Modeling Language, UML) 是一种面向对象并进行可视化系统分析的一种功能较强的建模语言, 可为软件开发各阶段提供模型化和可视化的技术支持。具体地说, UML 是一种标准的图形化建模语言, 它在面向对象进行分析的同时设计了一种标准来描述对象。UML 通过建立各种类、类属性、类之间的关联关系、类与对象之间的关系来实现系统的各个功能部分, 再集成所有的部分来组建整个模型。

Rational Rose 软件是一种基于统一建模语言 (UML 1.4) 的面向对象的可视化建模工具, 用于可视化建模和应用软件开发组件的构造。开发者运用 Rational Rose 软件, 可在数字单元、拖放式符号程序表中, 提取案例元素 (椭圆)、目标 (矩形)、消息或关系 (箭头) 这些工具单元来设计各种类, 开发者可以用这些工具来建立模型, 形成一个应用的整体框架。当开发者创建程序表时, Rational Rose 会记录并根据选择的开发语言比如 Visual C++、Visual Basic、Java、Oracle8、CORBA 或者数据定义语言 (Data Definition Language) 来产生相应的代码。需注意 Rational Software Architect 功能比 Rational Rose 更强大, 其 Software Modeler 采用的是 UML 2.0。

### 3 光伏并网系统的 CIM 建模

图 1 是一个接入光伏电站的经典 3 节点电力系统 [12], 3 节点系统是一个具有典型意义的简单电力系统, 一直被用于传统电力系统电压稳定课题的研究, 在光伏并网系统电压稳定及控制研究中也常被用于揭示电压失稳机理和展现稳定控制效果[12-14]。

图 1 中的光伏电站可根据研究目标具体设置为分布式光伏、较大规模光伏电站、大规模光伏电站、超大规模光伏基地及未接入光伏等各种规模容量, 因而可考察各种光伏接入对系统运行与稳定的影响[15]。

本文运用 Rational Rose 软件对图 1 所示光伏并网系统进行 CIM 建模。

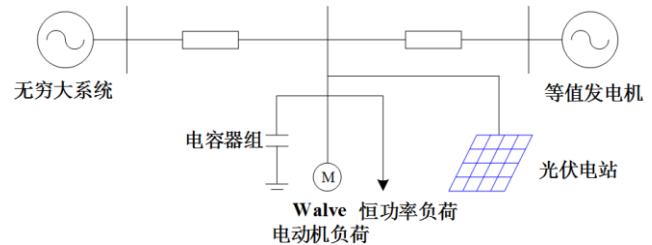


图 1 含光伏电站的经典 3 节点电力系统接线图

#### 3.1 连接模型

在未考虑变压器、断路器等设备的前提下, 建立图 1 所示系统的网络连接模型, 如图 2 所示, 为简化建模过程, 导电设备 (ConductingEquipment) 未考虑电力线路和变压器等双端设备, 这些设备将单独设计双端接线表。

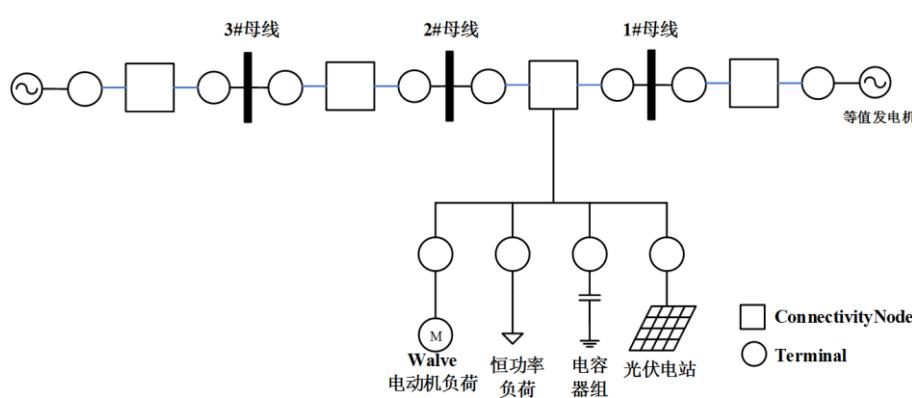


图 2 光伏并网系统连接模型

图 3 表达了导电设备 (ConductingEquipment) 的连接关系。端点 (Terminal) 是连接导电设备的物理节点, 连接节点 (ConnectivityNode) 是将端点组织起来的逻辑节点, 连接节点和端点之间是 1 对多的关联关

系, 每个端点都通过零阻抗与连接节点相连; 而多个 (图 2 中是 2 个) 连接节点通过物理连接组成一个拓扑节点 (TopologicalNode), 在图 2 中即母线。图 3 中, 关联关系 0..1、0..n、1 等表示关联重数 (0 表示关系不

存在), 例如一个设备容器 (ConductingContainer) 可以和多个连接节点 (ConnectivityNode) 相关联, 而一个连接节点只能和一个设备容器相关联。

光伏并网系统一共有 4 个负荷，包括 Valve 电动机负荷、恒功率负荷、电容器组及光伏电站，见图 1 和图 2。光伏电站本质是电源，也可视作吸收负功率的

负荷，为建模方便将其作为负荷处理。

采用电能用户类 (EnergyConsumer) 的子类等值负荷类 (EquivalentLoad) 建立负荷模型, 如图 4 所示。

等值负荷类继承了电能用户类的属性，如有功功率标称值（EnergyConsumer.pnom）和无功功率标称值（EnergyConsumer.qnom）。

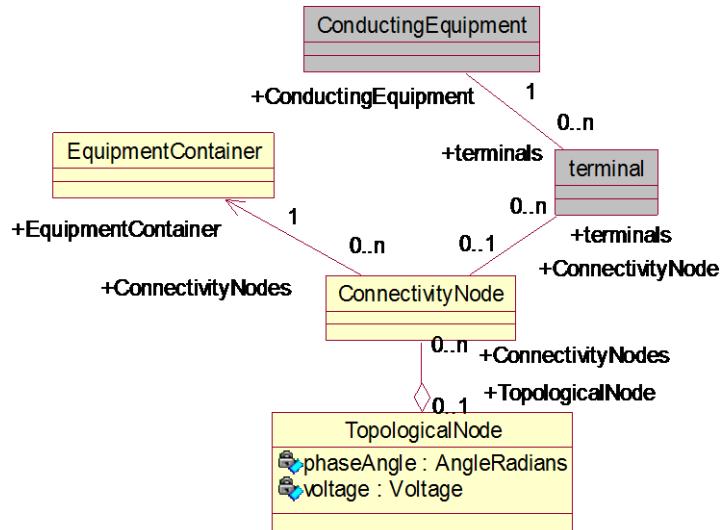


图 3 导电设备连接关系

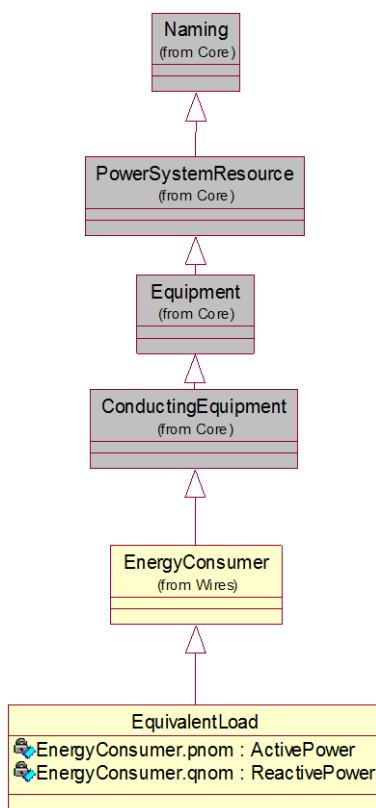


图 4 负荷模型

### 3.2 量测模型

见图 5 所示，量测模型主要由电力系统资源类（PowerSystemResource, PSR）、量测类（Measurement）、量测值类（MeasurementValue）以及量测值来源类（MeasurementValueSource）组成。

每个量测类（Measurement）对应着电力系统资源类PSR的一个技术指标，例如母线上的量测类对应母线当前的电压幅值与电压相角。由于涉及到光伏并网系统在不同工况下的运行数据，需要对系统进行多种计算，如稳态潮流计算、静态电压稳定连续潮流计算、暂态电压稳定计算、中长期电压稳定计算等，获得的计算数据须进行分类，因此定义了量测值来源类（MeasurementValueSource），它和量测值类（MeasurementValue）之间存在1对多的关联关系。

见图 6, 可以采用 2 种方法将量测类关联在电力设备上:

(1) 将量测类 (Measurement) 直接关联在电力系统资源 PSR 上, 关联关系是包容关系, 适用于描述弱连接关系的量测量, 如温度、压强、湿度、大小、质量等。

(2) 将量测类 (Measurement) 关联在导电设备 (ConductingEquipment) 的一个端点 (Terminal) 上, 适 用于描述强连接关系的量测量, 如电压、电流、功率等。本文采用第 2 种方法。

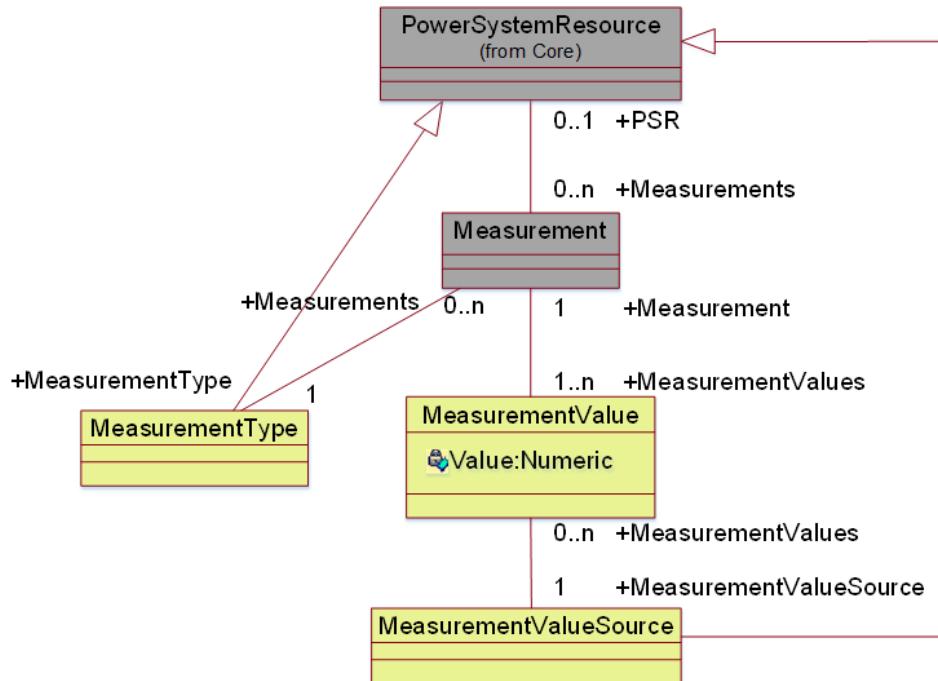


图 5 量测模型

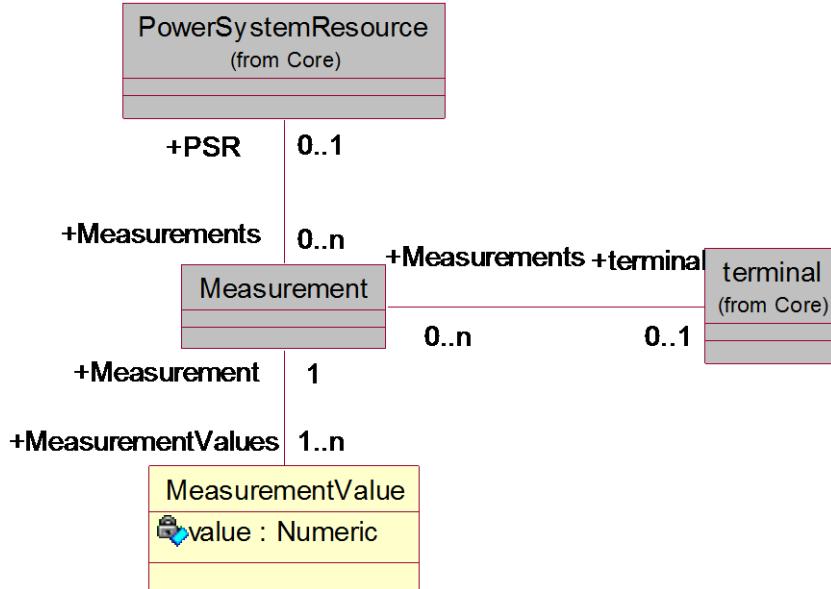


图 6 量测方法

### 3.3 拓扑模型

如图 7 所示, 拓扑模型是电力系统信息建模必需的模型, 它定义了系统的整个拓扑结构、设备之间的连接关系, 将 CIM 模型中单个的电力设备模型串联起来形成一个完整的整体[16]。

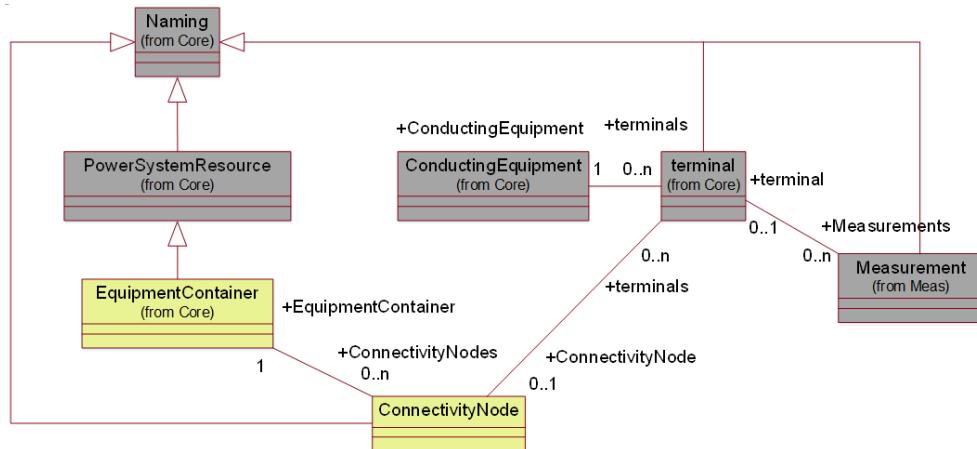


图 7 拓扑模型

## 4 基于 CIM 模型的数据库

运用 MySQL 建立 EMS 及光伏并网系统电压稳定监控软件或其它应用程序所需的数据表，并采用 Navicat for MySQL 开发工具进行设计，光伏并网系统各类工况下的数据为事先离线计算获得。

使用 Rational Rose 软件所建的光伏并网系统的 CIM 模型是面向对象的模型，而设计数据库时采用的是 MySQL 关系型数据库，因此将面向对象的模型映射到关系型数据库是将监控软件标准化需要解决的关键问题。

实际设计时可采用如下准则：尽量使用外键来表

达关系的映射，必要时建立关系表，来完全整体的反应 CIM 所扩展的模型关系[17]。

图 8 为按上述原则设计的数据库映射图。CIM 模型的每一个类，对应数据库的一个表，类名即表名。类的属性与表的列项一一对应。每个表根据各自的类确定好主键，每个类的类属性生成一个数据项，按继承、关联、聚合 3 种连接关系进行映射，再设置好外键将各个表连接起来；图 8 中虚线箭头表示继承关系，最终形成一个完整的具有严密结构的数据库。数据库中键的命名，主键定义为：id\_表名，外键定义为：FK\_与该表所关联的表的表名。而关联表需要同时设置两个外键（FK1、FK2）与关联的两个表直接相关。

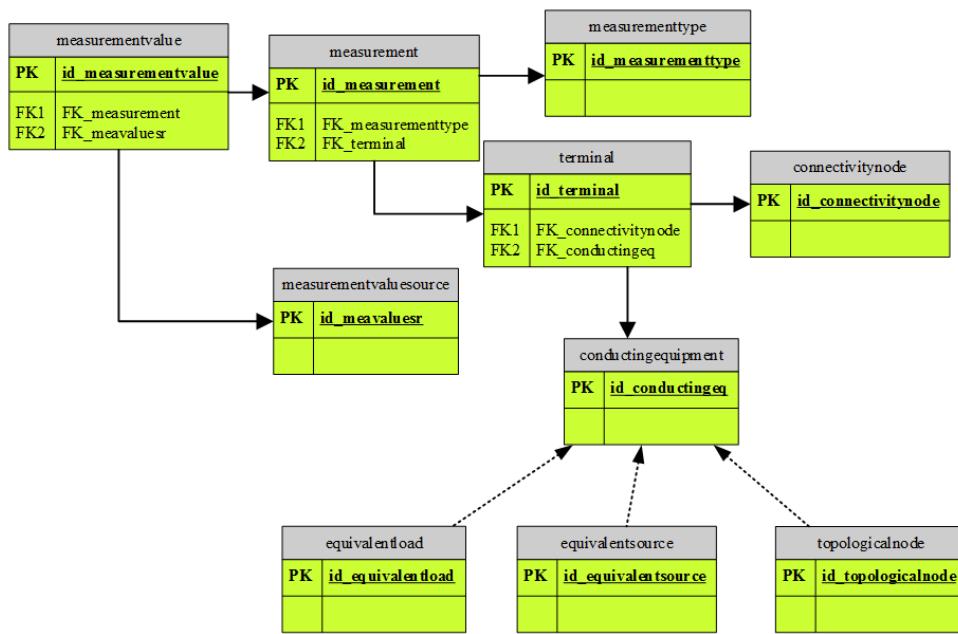


图 8 数据库映射图

创建好数据库之后,就可将数据库与 EMS 及设计的光伏发电并网系统电压稳定监控软件[15]或其它应用程序进行连接,实现监测和控制。一种简单的方法是使用开放数据库连接技术(Open Database Connectivity, ODBC)访问数据库。

## 5 结论

本文以一个可灵活设置为各种容量规模的光伏电站接入经典3节点电力系统为例,基于IEC 61970-301标准,运用Rational Rose软件对光伏并网系统进行了CIM建模,将光伏并网系统模型用UML语言表达;并设计了基于CIM模型的MySQL数据库,将面向对象的光伏并网系统信息模型转化为符合关系型数据库的信息进行存储,供EMS及电压稳定在线监控软件使用。下一步将继续完善光伏并网系统CIM模型,并完善与电压稳定监控软件的实时通信和在线联合调试。

## 参考文献

- [1] 张慎明,刘国定. IEC 61970 标准系列简介 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (14): 1-6.
- [2] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (1): 1-14.
- [3] 刘运鑫,姚良忠,廖思阳,等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (15): 5484-5496.
- [4] 李升,卫志农,孙国强,等. 大型光伏电站接入多机系统暂态电压稳定性研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 39 (12): 3356-3362.
- [5] 周伊琳,孙建伟,黄缙华,等. 基于IEC61970 标准的电力系统保护模型扩展方案研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (14): 120-125.
- [6] 胡勇,郭子健,刘奇峰,等. 基于IEC 61970/61850 的电动汽车充电站监控系统建模方案 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (2): 91-96.
- [7] 齐林海,柳超,任旭. 基于IEC 61970 的电网拓扑分析结果共享技术的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (17): 146-150.
- [8] 黄良,高正浩,曹洪,等. 一二次系统融合的电网风险评估实用化计算方法及数据建模研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (17): 104-110.
- [9] 崔巍,史永,孙兵. 基于IEC 61970/61968 电网模型构建和整合 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (17): 60-63.
- [10] 张少卿,王彬,符杨,等. 基于扩展IEC 61970 CIM 的园区蒸汽供热系统标准化建模 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (4): 70-76.
- [11] 曹阳,姚建国,杨胜春,等. 智能电网核心标准IEC 61970 最新进展 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (17): 1-4.
- [12] 李升,卫志农,孙国强,等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定分岔研究 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36 (1): 17-23.
- [13] Sheng Li, Zhinong Wei, Yanan Ma, et al. Prediction and control of Hopf bifurcation in a large-scale PV grid-connected system based on an optimised support vector machine [J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017 (14): 2666-2671.
- [14] Sheng Li, Zhinong Wei, Yanan Ma. Fuzzy load-shedding strategy considering photovoltaic output fluctuation characteristics and static voltage stability [J]. Energies, 2018, 11 (4): 779.
- [15] Sheng Li, Zhiyang Cao, Jian Cui, et al. Design of voltage stability monitoring simulation system for PV grid-connected system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1983: 012079.
- [16] JP Britton, Arnold N. deVos. CIM-based standards and CIM evolution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (2): 758-764.
- [17] 翁芳芳,林俐,杨以涵. CIM 模型与关系模型的一种映射方法的探讨 [J]. 现代电力, 2005, 22 (4): 20-24.