

## 智能变电站 PMU 通信服务结构研究

朱超<sup>1</sup>, 张兆君<sup>1</sup>, 倪玉玲<sup>2</sup>, 缪晓刚<sup>1</sup>, 吴兴泉<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网盐城供电公司, 江苏 盐城 224005)

**摘要:** 鉴于现有的同步相量测量单元(PMU)对象模型无法满足其需要计算频率变化率等测量值, 无法提供可路由的安全通信协议, 介绍了 IEC 61850-90-5 基本概念, 并在分析 IEC 61850-90-5 和 IEEE C37.118 两者异同的基础上, 提出了基于 IEC 61850-90-5 的 PMU 信息模型, 着重研究了按照 IEC 61850-90-5 的要求应用于同步相量交换的通信服务, 并配置了新的传输和控制块, 改进了现有的 PMU 对象模型, 提高了 IEEE C37.118 信息 IEC 61850-90-5 转变的能力, 更好地表现了同步相量, 并为 PMU 同主站之间建立统一通信模型打下了理论基础。

**关键词:** 同步相量测量装置; 对象模型; IEC 61850-90-5; 通信服务结构

**中图分类号:** TM76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2016)05-0048-05

随着智能电网技术不断成熟, 同步相量测量装置开始应用于智能变电站中。考虑到智能电网是一个互操作的系统<sup>[1]</sup>, 它要求同步相量测量单元(PMU)模型结构简单、功能清晰<sup>[2,3]</sup>, IEC 61850 标准的出现解决了这个问题<sup>[4]</sup>, 并为智能一次设备的发展铺平了道路。目前, 需要研究的内容主要包括: 基于 IEC 61850 标准的 PMU 建模、采样值报文的解析、时间同步、多媒体消息服务(MMS)及信息共享的内容<sup>[5]</sup>。

在广域测量应用中, PMU 同主站的通信采用 IEEE C37.118 标准<sup>[6]</sup>。IEC 61850-90-5 对 C37.118 发送内容与通信任务的传输方式进行了规范, 这种传输方式能够与 IEC 61850 兼容。通过分析 IEEE C37.118 的 4 类通信报文(命令、配置请求、文件头信息和数据传输), IEC 61850-90-5 给出了 IEEE C37.118 与 IEC 61850 数据模型之间的映射关系。这对于在基于 PMU 的广域测量系统领域应用 IEC 61850 技术有重要参考价值<sup>[6]</sup>。

文中通过比较 IEC 61850-90-5 和 IEEE C37.118 两者异同点, 提出了一种基于 IEC 61850-90-5 的 PMU 对象模型, 该模型在数据对象测量逻辑节点(MMXU)中添加了频率变化率(HzRte), 满足了 PMU 需要计算频率变化率测量量的要求, 还提高了灵活性以适应更多应用功能的需要。同时还研究了 IEC 61850-7-2 中按照 IEC 61850-90-5 要求应用于同步相量交换的通信服务, 并为了配置新的传输和控制块, 明确给出了具体的会话协议结构, 使模型功能更加清晰。

## 1 IEC 61850-90-5

IEC 61850-90-5 是通过广域网络传送数字化的系统状态和时间同步的电流测量值的通信协议, 通过

这种信息发送方式就可以实现基于在变电站自动化中已经获得普遍应用的 IEC 61850 协议的广域测量、保护与控制(WAMPAC)系统<sup>[7]</sup>。

2003 年, 为了提高时间同步相量测量的准确度, IEEE 开始了把 IEEE 1344 转变为 IEEE C37.118 的工作。这一改进需求来自于对 2003 年北美大停电事故的事后分析。2009 年, 在提出双徽标标准的要求时, 对 IEEE C37.118 和 IEC 61850 标准进行了评估, 两者比较结果如表 1 所示。

表 1 IEEE C37.118 和 IEC 61850 两者间的比较

功能	IEEE C37.118	IEC 61850 GOOSE 和 SV
数据流协议	是	采样值
测量速率 / 报告	10~30 个采样 / s	80~256 个采样 / 周波
内部可 IP 路由	是	否, 需要采用网桥路由器
应用目标	情境意识	控制
标准的地址安全性	否	是
通信方式完全规范	否	是
同步相量测量规范	是	否
事件驱动能力	否	GOOSE
语义驱动协议	否	是
标准化的配置语言	否	是

在提出双重徽标要求之前, 北美同步相量项目计划(NASPI)在工作中产生了许多对同步相量测量的要求, 这些要求包括跨越整个北美大陆的同步相量安全、大规模、广域传输的需要。IEC/IEEE 联合工作组制订策略, 把 IEEE C37.118 拆分为两部分<sup>[8]</sup>, 同时还要保持向基于 IEC 61850 技术的转变, 以满足 NASPI 的要求。IEEE C37.118.1 继续作为定义同步相量测量技术的全球标准, 而 IEEE C37.118.2 则是满足当前系统要求的 IEEE 通信协议, 使 IEC 61850-90-5 能够成为可扩展性更强也更安全的协议来满足 NASPI 的要求。

IEEE C37.118.1: 提出了电力系统的同步相量测

量。这个标准定义了在所有系统运行条件下的同步相量、频率和频率变化率。它规定了对这些测量量的评估方法并提出了在稳态和动态 2 种情况下都与标准相一致的要求,时标和同步要求也包括在其中。性能方面的要求通过一个参考模型进行了细化,表现地非常具体。这个文件对 PMU 进行了定义,既可以是一个单独的物理装置,也可以是另外物理装置中的功能单元。该标准没有规定硬件、软件或者相量、频率以及频率变化率的计算方法。

IEEE C37.118.2 定义了电力系统设备之间实时交换同步相量测量数据的方法。它规定了在 PMU、相量数据集中器和其他应用功能之间实时通信的报文发送方式,可以采用任何适当的通信协议实现。它还规定了报文的类型、内容和用途。对数据类型、内容和用途,对数据类型与格式也作了规定,对典型的测量系统以及通信选项及要求作出了描述。

IEC 61850-90-5 主要参考了 IEEE C37.118.1,作为同步相量的测量方法。IEC 61850-90-5 的范围是:(1)改进 61850 的对象模型,更好地表现同步相量;(2)提供可路由的安全通信协议,可以通过那些 IEC 61850 应用协议数据单元(ADPU)来传送 GOOSE 报文或者采样值;(3)提供从 IEEE C37.118 及其典型实施结构向 IEC 61850-90-5 转变的能力。

## 2 基于 IEC 61850-90-5 的 PMU 信息模型

### 2.1 现有 PMU 信息模型结构的不足

IEC 61850 将变电站自动化系统按照功能不同分为站控层、间隔层和过程层 3 层,同一功能可以分布在不同厂家提供的物理设备之间,且与物理设备无关。服务器用于提供数据,其他功能节点可访问它的资源。逻辑设备用于聚集有关的逻辑节点和数据。逻辑节点是功能元件的容器,对功能元件进行描述。每个逻辑节点的输出(状态信息、测量值和计量值)、控制(开关量控制以及设定控制)和设置在 IEC 61850 标准中定义为数据属性及语义。逻辑节点之间交换的信息就是这些专门的数据属性及其语义代表的。PMU 的逻辑节点功能分布如图 1 所示。

图 1 中,逻辑节点 MMXU 和 MSQI 成对出现,用来计算三相系统的测量值。它们从位于过程层中的逻辑节点 TVTR 和 TCTR 获取三相采样值,计算出基波电流相量、基波电压相量、系统功率等后,将这些计算结果作为站控层逻辑节点 IHMI 的数据源。逻辑节点 LLN0 含有逻辑设备 PMU 的相关数据,用于描述所有逻辑节点的公共行为。RDRE 是扰动记录逻辑节点,它接收间隔层逻辑节点 TVTR、TCTR、GGIO 发送来的数据,并根据相应的启动判据,输出符合“电力系统瞬

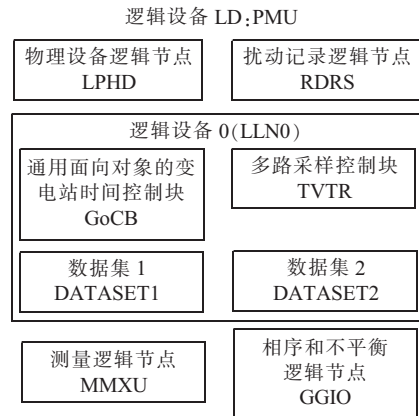


图 1 PMU 的逻辑节点功能分布

态数据交换 IEEE 标准格式(COMTRADE)”的录波文件<sup>[9]</sup>,进而为站控层的逻辑节点 RDRS 提供服务。

然而,IEC 61850-7-4 标准中定义的 MMXU 和 MSQI 等兼容逻辑节点都不具备表示频率变化率(HzRte)的数据成员,无法满足 PMU 需要计算测量值的要求。若强行在逻辑节点中扩展 HzRte 数据将引入更多的逻辑节点,做法不规范<sup>[10]</sup>。这是现有模型最大的不足。

此外,把 IEC 61850 应用于变电站与变电站之间以及变电站与控制中心之间通信的工作,尽管要应用于新的通信体系结构/实施部署(IEC 61850-9-1/2),但是 GOOSE 技术仍然保持了不可路由状态。也就是说,GOOSE 报文必须直接映射到以太网<sup>[11]</sup>,保证传输报文信息要在 4 ms 内完成<sup>[12]</sup>,由此可见其对时间要求非常严格。这样导致加密和其他影响传输速度的安全措施都不能采用,使防护措施的选择以及其研究方向变得很狭隘。

### 2.2 引入 IEC 61850-90-5 后的 PMU 信息模型

在 IEEE C37.118.1 标准中,规定了测量电压或者电流相量、频率、以及频率变化率等同步相量的方法,而且还将测量量分为保护类别(P类)和测量类别(M类)。在 IEC 61850 标准中,现有的 MMXU 定义了表示电压/电流测量值和频率的数据对象。而在 IEC 61850-90-5 中,利用测量逻辑节点(MMXU),对测量逻辑节点(MMXU)进行扩展,添加数据成员 HzRte,来表示频率变化率这一信息。

图 2 为引入 IEC 61850-90-5 后的 PMU 信息模型。图中 PMU1 为 PMU 所对应的逻辑设备的实例;MMXU 表示运行时测量逻辑节点,逻辑节点的数据以电流/电压相量、有功功率、无功功率和系统频率为主,这里对其有功功率信息 TotW 详细展开。MMXU.TotW 作为数据对象,其数据属性包括测量瞬时值(instMag)、死区值(mag)、品质(q)、单位(units)等。数据对象 MMXU.HzRte 属于公共数据类测量值(MV)而

不属于基本数据类模拟值 (Analogue Value), 以保证 MMXU 的数据成员之间相统一。数据成员 HzRte 的成功添加使得 PMU 乃至监控系统不再是局限于电网某时刻的频率值, 而是能够清晰地看出频率变化趋势, 从而提供异常预警、状态评估和决策支持<sup>[11]</sup>。

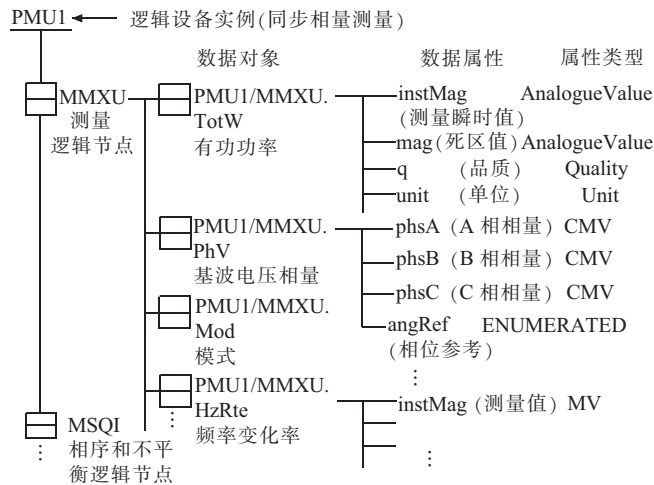


图2 基于 IEC 61850-90-5 的 PMU 的信息模型

同步相量测量需要另一个重要信息是能够知道采样速率。在 IEC 61850 中, 是通过合理配置之前已经存在的 MMXU 数据对象实现的, 对计算方法 (ClcMth) 的例举表进行了扩展, 保护类和测量类都包含在内。

计算模式 (ClcMod): IEEE C37.118.1 可以规定测量方法为周期性的。IEC 61850-7-4 用于 ClcMod 的值确定为周期性 (PERIOD)。

计算周期类型 (ClcIntvTyp): IEEE C37.118 通常是以每秒为周期进行测量的。而 IEC 61850-90-5 具有更多的灵活性以适应其他应用功能的需要, 增加了对毫秒 (MS)、每周波 (PER-CYCLE) 和周波 (CYCLE) 周期类型的支持。要仿效 IEEE C37.118 功能, 应该采用 MS 值。

计算间隔周期 (ClcIntvPer): 按照 ClcIntvPer 的值设置。

IEEE C37.118 也允许传送离散的数字信息。这些语义 / 数据对象已经作为数据集的独立构件存在于 IEC 61850 中。

### 3 基于 IEC 61850-90-5 的 PMU 通信模型

IEC 61850 具有抽象通信服务接口 (ACSI), 对 IEC 61850 所支持的各种通信服务含义作出了规定。文中着重研究 IEC 61850-7-2 中按照 IEC 61850-90-5 的要求应用于同步相量交换的那些服务, 具体如图 3 所示。

MMXU 逻辑节点用于表示按照 IEEE C37.118.1 规定生成的同步相量测量值。MMXU 的信息被放入一个或者多个数据集, 这些数据集的发送由恰当的控制

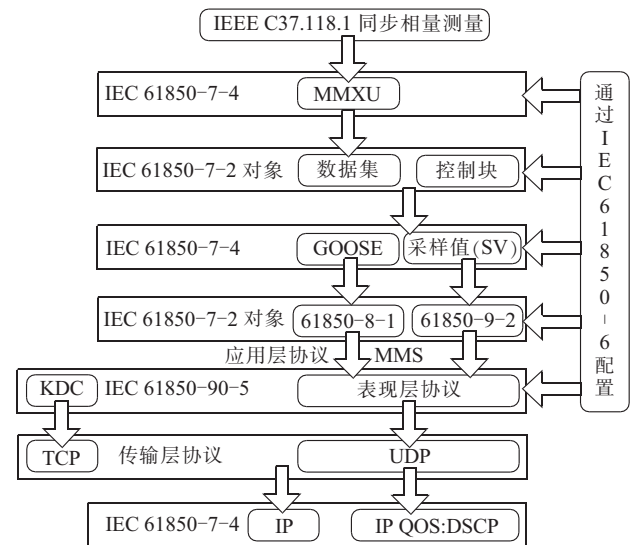


图3 IEC 61850-90-5 的通信服务结构

块控制, 如 GOOSE 或者采样值 (SV) 控制块。值得注意的是, 数据集可以包括除了同步相量测量量之外的其他信息。IEC 61850-90-5 定义了新的控制块来处理可路由的 IEC 61850-90-5 语义。RS 控制块用于控制可路由的 SV 数据, 而 RG 控制块用于控制可路由的 GOOSE 状态信息。数据集和控制块的组合确定了要使用哪种服务来交换数据集信息。根据控制块的类型 (RS 或者 RG 类型), 分别按照 IEC 61850-9-2 和 IEC 61850-8-1 中确定的规则生成应用报文并且对其编码。应用报文装入 IEC 61850 会话层, 通过 IEC 61850-90-5 的特殊密钥提供安全保障与管理。被封装的应用报文通过 UDP/IP 组播服务发布, 使用区分服务控制协议 (DSCP) 来提供 IP 优先级标识, 这样数据包就不容易由于路由器拥塞而丢失。

为了配置新的传输与控制块, 对 IEC 61850-6 的变电站配置语言 (SCL) 做了扩展。IEC 61850-90-5 会话协议具有在单个会话协议数据单元 (SPDU) 中传送 GOOSE 或者 SV 应用报文 (APDU) 组的能力。这个协议还能够支持基于以太网的 GOOSE 和 SV 数据包安全安全传输隧道, 以使现有的 GOOSE 和 SV 报文更容易在变电站和控制中心之间变换。具体的会话协议结构如图 4 所示。

为了提供安全性, 实施完美传送 (perfect-forward) 的安全概念。这个安全方式设计目标是让加密密钥以某种特定的方式旋转, 要能给信息订阅者一个警示信息, 让订阅方知道下一次密钥旋转即将发生 (TimeToNextKey) 并检查是否与当前的密钥失去同步。IEC 61850-90-5 安全规则强制在整个 SPDU 内容上使用识别标识, 识别标识通过对称密钥实现, 用对称密钥创建一个哈希运算消息认证码 (Hash-based Message Authentication Code-HMAC)。最后, IEC

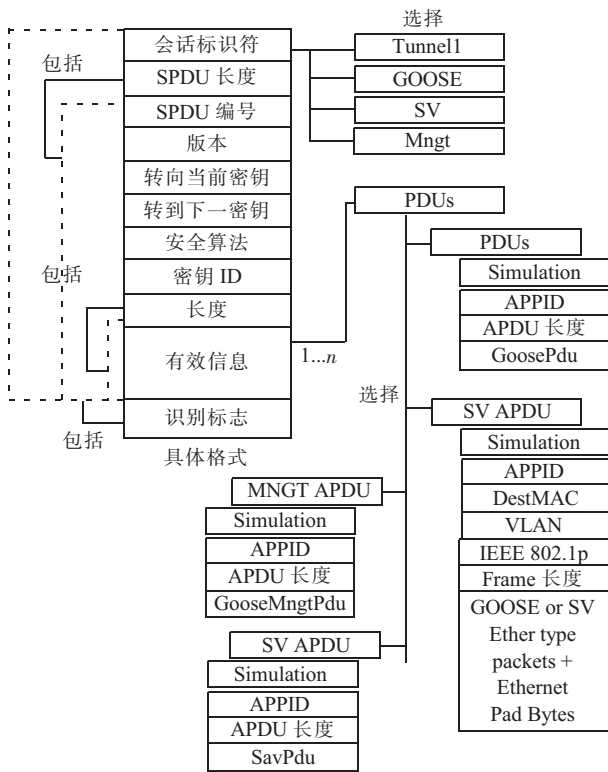


图4 会话协议结构

61850-90-5 会话协议支持对 SPDU 有效信息内容进行加密。

SPDU 是通过组播 UDP/IP 发送。过去,应用 UDP/IP 组播是有问题的,因为很难确定/配置数据包的传输路径。许多的 IP 组播数据包是通过路由器所支持的各个路径发送出去的。为了有助于控制和路径选择,IEC 61850-90-5 明确提出了使用网络组群管理协议第 3 版(IGMP V3:RFC3376)。IGMP V3 与之前版本 IGMP 的差别在于组播地址订阅可以基于发布方的源 IP 地址进行过滤,即源地址过滤(Source Filtering)。通过源地址过滤,路由器就可以确定出合适的路径,并通过这条路径来发送组播数据,避免了把数据包通过所有可能路径发送出去的现象。

密钥管理和密钥分配中心协议(KDC)是以组群解释域(RFC3547-GDOI)为基础的。组群解释域具有密钥分配中心安全交换密钥的能力,或者是客户请求密钥,或者是密钥分配中心把密钥发送到适当的订阅方。最初组群解释域只允许把密钥与 IP 地址联系在一起,证明了这个安全模式/要求对 IEC 61850-90-5 而言是不够的。所以对组群解释域协议做了扩展,以提供基于目的地址寻址、服务和数据集定义的密钥管理。这样,即便目的地址和数据集内容相同,也能够基于其发送服务(例如 GOOSE 或者 SV)来分配和管理密钥。

#### 4 新标准的关键技术转变

IEC 61850-90-5 包括了 IEEE C37.118.2 向 IEC

61850 转变的多方面内容,向 IEC 61850 逐步转变的关键技术包括:

(1) 改变 IEC 61850-6 以支持通过变电站配置描述语言(SCL)来配置 IEEE C37.118.2。

(2) 在 IEC 61850-90-5 的环境中使用 GOOSE 或者 SV 而不需要明确的控制块交互。这样就可以利用 SCL 配置,并且用 IEC 61850-90-5 取代了 IEEE C37.118.2,而不需要通过 TCP/IP 来支持完整的 IEC 61850-8-1(如 MMS)。

IEEE C37.118 的应用促成了结构化部署的实体设备在现有系统中的运用,即所谓的相量数据集中器(PDC)。PDC 的主要目的是提供扩展性更强的同步相量测量量发送功能,因为通常变电站的通信能力有限,而且一般都不能把测量量发送到在数量上能够满足要求的客户端。PDC 的另一个典型目的是提供不同的 PMU 测量量之间的时间匹配功能,这样就不再要求数据客户端具备这一功能了(如 PDC 作为客户应用功能的延伸)。在 IEC 61850-90-5 的环境下,PDC 需要依据 IEC 61850 和 SCL 的代理/建模能力来配置。IEC 61850-90-5 包括了支持 PDC 概念的清晰而明确的建模方法。另一个得到解决的问题是实施协议,它清楚地确定了如何把 IEEE C37.118.2 的信息转换到 IEC 61850 以及如何利用 IEC 61850 采样值来可靠传输同步相量测量量。

#### 5 结束语

为了使 PMU 装置更好地应用到智能变电站中,文中提出了一种基于 IEC 61850-90-5 的同步相量测量装置的对象模型,该模型不仅满足了 PMU 需要计算频率变化率测量量的要求,提高了灵活性以适应更多应用功能的需要。还着重研究了 IEC 61850-7-2 中按照 IEC 61850-90-5 要求的应用于同步相量交换的通信服务,同时对 SCL 做了扩展,给出了具体的会话协议结构,使模型功能更加清晰,更加明确。该对象模型为 PMU 同主站之间建立统一通信模型提供了理论支持,同时传输信息的防护措施不再受传输速度的限制,开拓了其发展领域。

#### 参考文献:

- [1] 刘英挺,卢小峰,毛杰,等.智能电网通信及组网技术[M].北京:电子工业出版社,2013:34-38.
- [2] 徐瑞林,高晋,杨洪涛,等.智能变电站过程采样值传输协议的分析与程序实现[J].江苏电机工程,2012,31(3):46-53.
- [3] 陈昊,张建忠,王玉荣.基于 SV 模型的风速时间序列峰度分析[J].中国电力,2011,44(1):90-93.
- [4] 丁心志,李慧杰,杨慧霞,等.基于 IEC/TC57 国际标准体系现状分析与展望[J].电力系统保护与控制,2014,42(21):145-154.

- [5] 王亮, 裴愉涛, 李力, 等. 广域同步测量技术在智能电网保护与控制中的应用[J]. 江苏电机工程, 2015, 35(2): 43-46.
- [6] 任雁铭, 操丰梅. IEC 61850 新动向和新应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 1-6.
- [7] IEC/TR 61850-90-5 Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 90-5: Use of IEC 61850 to Transmit Synchrophasor Information According to IEEE C37.118[S]. 2012-01.
- [8] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation. Use of IEC 61850 to Transmit Synchrophasor Information According to IEEE C37.118[S].
- [9] 许勇, 王慧铮, 李倩, 等. 智能变电站同步相量测量装置研制[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 1-5.
- [10] 朱超, 王锐, 顾小宇, 等. 智能电站中电子式互感器数字接口的设计[J]. 电器与能效管理技术, 2015(11): 28-32.
- [11] 王义军, 刘斌, 陈樨. 智能变电站全站统一式通信网络研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(14): 27-31.
- [12] 王保义, 王民安, 张少敏. 一种基于 GCM 的智能变电站报文安全传输方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 87-92.

作者简介:

朱超(1987), 男, 江苏南京人, 博士, 从事变电站自动化与嵌入式系统设计研究工作;

张兆君(1977), 男, 江苏金坛人, 工程师, 从事变电运行工作;

倪玉玲(1990), 女, 江苏盐城人, 硕士, 从事智能变电站自动化研究工作;

缪晓刚(1988), 男, 江苏南通人, 硕士, 从事特高压变电运行工作;

吴兴泉(1989), 男, 广东中山人, 硕士, 从事特高压变电运行工作。

## Research on Communication Service Structure of PMU in Intelligent Substation

ZHU Chao<sup>1</sup>, ZHANG Zhaojun<sup>1</sup>, NI Yuling<sup>2</sup>, MIAO Xiaogang<sup>1</sup>, WU Xingquan<sup>1</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China;

2. State Grid Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224005, China)

**Abstract:** The existing object model of PMU cannot meet the requirement of computing the frequency variation or provide safe routable communication protocol. So in this paper, a PMU information model based on IEC 61850-90-5 is proposed after analyzing the similarities and differences between IEC 61850-90-5 and IEEE C37.118. The communication service used for synchronous phasor exchange is studied according to 90-5 protocol. And new transmission and control blocks are configured to improve the existing PMU object model. As a result, this method improves transforming ability from IEEE C37.118 to IEC 61850-90-5, and achieves better performance of synchronous measurement. It also lays the theoretical foundations for establishing a unified communication model between PMU and master station.

**Key words:** synchronized phasor measurement unit (PMU); object model; IEC 61850-90-5; communication service structure

(上接第 47 页)

- [11] 郑秀玉, 黄娜, 余建华, 等. 海岛微电网多种分布式电源定容研究[J]. 电源技术, 2014, 38(10): 1913-1916.
- [12] 张翼. 电力储能技术发展和应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 81-84.
- 王博(1988), 男, 河北安平人, 工程师, 从事电力系统节能、城市配电网智能化改造等研究工作;
- 杜云虎(1974), 男, 江苏连云港人, 工程师, 从事电力营销及用电管理等研究工作;
- 伏祥运(1977), 男, 江苏连云港人, 高级工程师, 从事电网经济调度、运行及主动配电网等研究工作;
- 邵林(1987), 男, 江苏盐城人, 工程师, 从事电网经济调度与运行等研究工作。

作者简介:

岳付昌(1985), 男, 江苏连云港人, 工程师, 从事智能微电网及主动配电网等研究工作;

## Architecture Design and Implementation of Off-grid Multi-energy Micro-grid in Marine Areas

YUE Fuchang<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, DU Yunhu<sup>1</sup>, FU Xiangyun<sup>1</sup>, SHAO Lin<sup>2</sup>

(1. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222000, China;

2. State Grid Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224006, China)

**Abstract:** Traditional micro-grids in marine areas have the disadvantages of single energy, less participating in energy regulation of flexible loads, and simple grid structure. Against these disadvantages the functional architecture of multi-energy micro-grid in marine areas was designed in this paper. The micro-grid made full use of the characteristics of clean energy such as wave, wind and solar, and took advantage of VSG technology, to improve the stability of distributed energy generation. Energy router was treated as the control center of the micro-grid to realize controlling source-load interaction by adjusting flexible loads such as seawater desalination device and P2G device. Implementations of energy router, VSG, source-load interaction, CPS in micro-grid in marine areas were studied and applied to the micro-grid demonstration project in Cheniushan island.

**Key words:** micro-grid in marine areas; energy router; VSG; source-load interaction; CPS