

DOI: 10.7667/PSPC151029

# 云—层—端三层架构体系的随机性电源即插即用构想

李瑞生

(许继集团研发中心, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 分析了分布式发电到分布式电源及微电网接入配电网的共性问题。将光伏发电、风力发电、储能装置、电动汽车统一按“随机性电源”考虑。从应用场景专用设计、工程应用功率匹配、对外接口端子、两电平与三电平拓扑结构、过电压异常响应、监视、控制和运维、并网及孤岛防护、渗透率及有效发电量渗透率等方面, 分析随机性电源接入配电网存在的问题, 提出了即插即用随机性电源的云—层—端三层体系架构。云运维实现运行维护即插即用, 层控制实现有序控制即插即用, 端互联实现应用场景、工程应用功率匹配、安全并网、信息互联、最大发电量渗透率接入配电网的即插即用。

**关键词:** 随机性电源; 即插即用; 云运维; 层控制; 端互联

## Idea of random power supply plug and play based on cloud-layer-terminal three layer architecture

LI Ruisheng

(XJ Group Research and Development Center, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The common problem of distributed generation and microgrid accessing to distribution network is analyzed. Photovoltaic generation, wind generation, energy storage devices and electric cars are considered as random power supply. From special design for application scene, power matching for engineering application, external interface terminal, two-level and three-level topology, abnormal over voltage response, monitoring control and operation and maintenance, grid-connected and island protection, capacity penetration and generating capacity penetration and so on, the problem of random power supply accessing to distribution network is analyzed, cloud-layer-terminal three-layer architecture of plug and play random power supply is put forward. It achieves the goals of cloud-operation and maintenance plug and play, layer-orderly control plug and play, terminal-application scene, power matching for engineering application, grid security, information interconnection and maximum generating capacity penetration plug and play.

**Key words:** random power supply; plug and play; cloud operation and maintenance; layer control; terminal interconnection

## 0 引言

分布式发电(Distributed generation, DG)可充分利用各种可用的分散存在的光伏发电, 风力发电等接入配电网, 实现可再生能源充分利用。文献[1-3]分析了分布式发电接入配电网的作用及对配电网的影响。分布式发电接入配电网, 配电网潮流由传统的单向流动变为双向流动, 配电网由被动配电网(Passive distribution network, PDN)变为主动配电网(Active distribution network, AND)。文献[4-5]介绍了架空线路及电缆线路主动配电网保护解决方案。光伏发电、风力发电对配电网及用户使用者来说具有随

机性, 属于典型的间歇性电源。DG 配备储能装置(Energy Storage, ES)构成的分布式电源(Distributed Resources, DR), 可实现把电能储存起来, 在配电网需要时供给配电网, 配电网不需要时储存多余的电能, 有效改善分布式发电的间歇性, 把间歇性的分布式发电变成稳定的分布式电源。在分布式电源规划研究上, 文献[6]建立了面向促进间歇性分布式电源高效利用的ADN 双层场景规划模型; 文献[7]利用蓄电池和超级电容器的互补特性, 提出了一种以优化蓄电池工作状态为原则, 提高储能系统整体经济性为目标的能量管理策略; 文献[8]研究了在无功补偿电容器的安装容量和位置不确定的情况下无功补偿的最优规划方案。在分布式电源技术发展趋势上, 文献[9]研究了储能作为核心承载的多能互补技术和互动技

基金项目: 国家能源应用技术研究及工程示范(NY20150302)

术的技术趋势。但 DR 接入配电网时，同 DG 一样，靠配电网提供稳定的电压及频率支撑才能运行，离开配电网提供的电压及频率支撑，DR 及 DG 均无法运行。DR 配备就近消纳的负荷，再配备相应的控制装置接入配电网，构成的微电网(Micro-Grid, MG)既可实现稳定的分布式电源特性，又可实现离网运行，在配电网故障或无法供给电力时，不依赖配电网的电压频率支撑，依靠自主电源的电压频率支撑，通过离网运行控制实现离网运行能量平衡及电压频率的稳定，给负荷供电。MG 并网运行依靠配电网提供稳定的电压频率支撑才能运行，这方面特性同 DG 及 DR；离网运行靠自主电源支撑电压频率，这一特点是与 DG 及 DR 的差异。MG 另一特点是并网运行转换到离网运行或离网运行转换到并网运行时需要模式切换，而 DG 及 DR 接入不需要模式切换。DG 及 DR 接入一直工作在 P/Q 模式；MG 接入时，模式控制及连接电池的双向储能变流器构成能量转换系统(Power Conversion System, PCS)，MG 模式切换过程中，PCS 需要从 P/Q 到 V/f 模式之间切换，同时带来了并网到离网时的“缝隙”，即短暂的停电间隔，尽管可以尽量小地缩短“缝隙”，但不能根本地消除“缝隙”。从 DG 到 DR 改善了电源间歇性，从 DR 到 MG 改善了不需要配电网支撑局部电源的供电问题。可以说，是技术上使得间歇性电源得到了充分的利用，但是不论是 DG、DR 还是 MG，接入配电网共同的特征是：由于接入的电源提供有功，在发电突然增大，或就近负荷突然减少，或配电网重构过程中负荷的突然转移，使得接入点的电压突然升高，出现暂态过电压现象，电压升高到配电网允许电压上限时，严重影响配电网的电压质量，这时不得不让 DG(DR 或 MG)退出运行。DG(DR 或 MG)频繁的投入/退出运行，对配电网来说，影响配电网的可靠运行，对可再生能源来说，影响新能源的利用率。

可再生能源代替石化能源是一种趋势，以电代油的电动汽车在交通领域发展也是一种必然。目前电动汽车不仅作为交通工具，电动汽车的 V2G (Vehicle-to-grid, V2G)特性可将电动汽车的电能输送到电网，使电动汽车具备双向可控负荷 (Controllable Load, CL)特征，可作为配电网的有效可调负荷使用。电动汽车充电站的充电设备，同储能设备的储能变流器，也可归属于随机性电源一类，接入配电网后对配电网的影响与 DG 相同。本文把光伏发电、风力发电、储能装置、电动汽车统一按“随机性电源”考虑，从不同类型随机性电源接入配电网的工程应用、外接口端子、功率模块并联、监视控制运行维护、发电量渗透率、安全并网及信

息互联等不同角度出发，系统考虑随机性电源接入配电网需要的系统及装置设计问题，真正做到随机性电源即插即用。

## 1 随机性电源的共性问题

### 1.1 应用场景专用设计

不论是光伏发电、风力发电，还是储能装置，电动汽车接入配电网均需要不同类型的电源相互转换，其转换电路拓扑结构有采用一级拓扑结构，也有采用两级拓扑结构，如图 1 所示。其本质是实现电源之间的转换。由于应用场景的不同，又把本质相同的电力电子电源转换装置区分成光伏逆变器，风机变流器，充电机，储能变流器。由于根据不同应用场景专门设计，带来的问题是：1) 交流侧电压 (升压变压器一次侧)自行定义，无统一标准，例如有 290VAC, 380VAC 等；2) 直流侧电压，输入范围不统一，差异很大。接入配电网后，即使相同功率的电力电子转换装置，由于输出电感不同，对配电网的节点电压，谐波等电能质量影响不一。

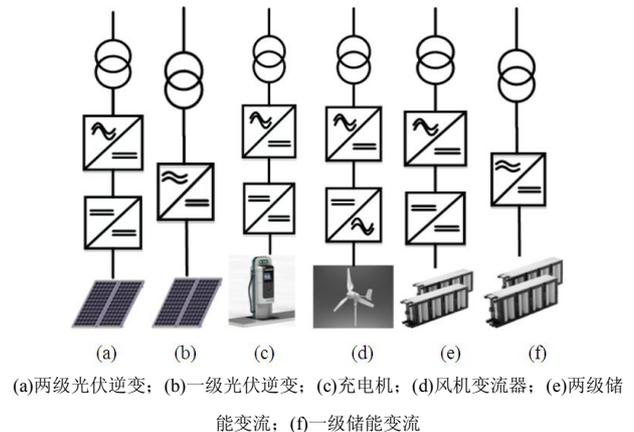


图 1 随机性电源拓扑结构

Fig. 1 Topology of random power supply

### 1.2 工程应用功率匹配

随机性电源除了需要满足电源转换功能外，还需要功率匹配，实际工程中电源转换又不可能把所有功率段全覆盖。工程应用中，需要功率匹配时，选择接近的较大的功率规格。如：峰瓦 90 kW 的光伏最好匹配 90 kW 的光伏逆变器，由于没有 90 kW 逆变器规格，工程选型时按大于并接近 90 kW 逆变器选择，实际选择 100 kW 逆变器。这样的工程选型又会带来逆变器不是最佳的工作状态，按 NB/T 32004-2013《光伏发电并网逆变器技术规范》最苛刻的型式试验 III 级要求，逆变器在额定功率 30% 以下时，谐波和波形畸变不再考核。原因是逆变器在额定功率 30%以下时，谐波和波形畸变增大。工

程选型的大马拉小车功率不匹配现象，会给配电网电能质量带来影响。

### 1.3 对外接口端子

随机性电源对外接口分为强电连接的电气接口，弱电连接的通信接口。由于没有统一的规范与标准，目前设备厂家自行定义各自产品接口形式，标准不统一，种类繁多，工程应用复杂。如图2是不同应用场景随机性电源的强电连接的电气接口端子。接口端子种类繁多，造成工程应用不得不针对性地专门设计，以及后续的维护困难。弱电连接的通信接口，物理接口采用以太网/RS485/CAN，通信规约 Modbus/IPModbus/IEC61850/私有规约，造成系统应用需要通信规约转换接口装置，解析不同的通信规约，系统连接可靠性降低。



(a) 光伏专用插接端子



(b) 充电机航空插头端子



(c) 风机专用接线端子



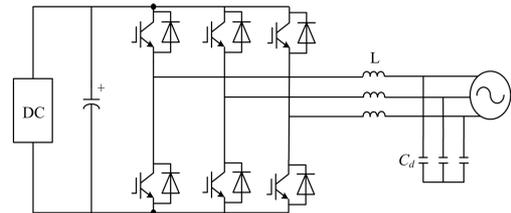
(d) 储能通用型接线端子

图2 随机性电源电气接口端子

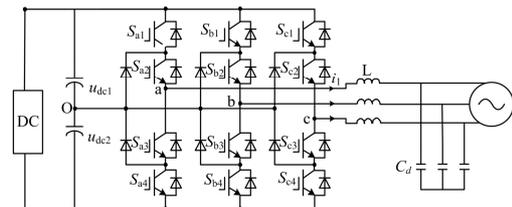
Fig. 2 Electrical interface terminal of random power supply

### 1.4 两电平与三电平拓扑结构

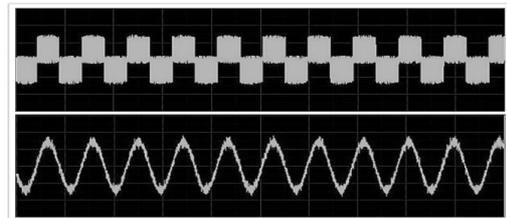
传统的电源转换采用成熟的两电平技术，需要对输出进行LC滤波设计；多电平技术在超过10个电平以后，可以不需要滤波输出工频交流。多电平技术在高压直流输电应用很成熟，一个模块1.6 kV构成多电平工频输出，不需要专门滤波设计，如：浙江舟山±200 kV五端柔性直流输电科技示范工程，采用264电平。随机性电源由于要考虑成本问题，采用超过三电平以上的多电平技术没有成本优势。但可以采用最少的多电平技术——三电平技术，其优点是：接近正弦波的输出，谐波含量小，转换效率高，滤波电感小，对系统影响小。三电平技术的滤波电感小，可以降低成本，整机体积重量较小，功率密度高。针对三电平光伏逆变器仿真研究表明<sup>[10-11]</sup>，采用三电平实现电力电子电源转换可行并且优势明显，文献[12-15]介绍了不同应用场景的控制方法及研制出的相应装置。如图3是两电平与三电平拓扑结构与波形输出，从图3(d)中可以看出，三电平输出接近正弦波，简单的滤波可以得到很好的交流输出。



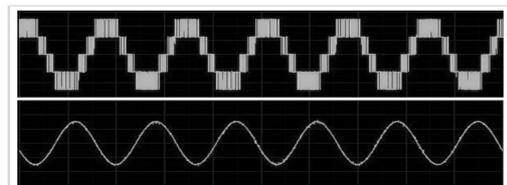
(a) 两电平拓扑电路



(b) 三电平拓扑电路



(c) 两电平输出



(d) 三电平输出

图3 两电平与三电平拓扑结构及电压波形

Fig. 3 Two-level and three-level topology and voltage waveform

两电平技术不能实现模组化设计，造成电源转换规格多，种类多，功率组合不灵活，扩容、运输、维护升级均不方便，三电平技术可实现功率模块并联，扩容方便，产品规格减少，维护方便。

### 1.5 过电压异常响应

DG 接入配电网，注入有功功率会引起节点电压升高，相关标准规定了电压异常响应 DG 脱网时间，见表 1，为国内外相关标准的过电压异常响应要求。从相关标准可以看出，DG 接入配电网，对

电压异常响应要求非常苛刻，过电压超过  $1.1U_n$ ，在规定的时间内要求 DG 脱网，其中表 1 中标准<sup>[1-2]</sup>最严格， $1.1U_n < U < 1.2U_n$ ，脱网时间 60(100)电网周期； $U \geq 1.2U_n$ ，脱网时间 10 个电网周期。标准之所以规定这么严格，是为了避免 DG 接入对配电网造成影响，在电压异常时 DG 退出运行。对接入 380 V 电压等级的 DG，仅仅相电压超过 242 V 就要退出。带来的结果是：标准对接入 DG 的严厉要求，造成 DG 接入配电网的频繁退出。

表 1 相关标准的过电压异常响应要求

Table 1 Over voltage response requirements for related standards

过电压范围(% $U_n$ )	最大分闸周期数 $N^{\text{①}}$	相关标准
$110 < U < 120$	$60^{[1]}, 100^{[2]}, \geq 500^{[8]}$	[1]IEEE 1547.2003 《IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources》 [2]Q/GDW 564-2010 《储能系统接入配电网技术规定》
$U \geq 120$	$10^{[1]}, 10^{[2]}, 6^{[13]}$	[3]Q/GDW 480-2010 《分布式电源接入电网技术规定》 [4]NB/T 32004-2013 《光伏发电并网逆变器技术规范》
$110 < U < 135$	$100^{[3][4][5][6][7][9][10]}, 120^{[11]}$	[5]GB/T 20046-2006 《光伏(PV)系统电网接口特性》 [6]GB/T 19939-2005 《光伏系统并网技术要求》
$U \geq 135$	$10^{[3][9]}, 2.5^{[4][5][6][7][10]}, 3^{[11]}$	[7]Q/GDW 617-2011 《光伏电站接入电网技术规定》 [8]GB/Z 19964-2005 《光伏电站接入电力系统技术规定》
$120 \leq U \leq 130$	$\geq 2.5^{[8]}$	[9]GB/T 29319-2012 《光伏发电系统接入配电网技术规定》 [10]CGC/GF001:2009 《400V 以下低压并网光伏发电专用逆变器技术要求和试验方法》
$110 < U < 115$	$6^{[12]}$	[11]IEC 61727-2004 《Photovoltaic(PV)systems-characteristics of the utility interface》 [12]VDE-AR-N 4105:2011-08 《Power generation systems connected to the low-voltage distribution network》
$U > 115$	$6^{[12]}$	[13]BDEW 《Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network》

注：①中  $N$  代表电网周期  $T$  的个数，其值由国际标准的 60 Hz、国内标准的 50 Hz 分别计算得到。

### 1.6 监视、控制、运维

随机性电源的特点是分散广、地处偏远、运行环境恶劣、设备可靠性不高、运维工作量大。设备故障无法及时发现，影响发电质量和经济效益，同时随机性电源运行效率缺乏分析优化，达不到最优化运行。目前对分布式随机性电源监视、控制、运维采用的方案，既有历史原因继承下来的通过监控系统上送的信息，也有通过专用的并网接口装置上送的信息。监控及其运维系统形式多样，接入系统架构不统一，对运维的要求、系统的配置要求都不规范，带来随机性电源控制困难，同时也没有更多地考虑控制、运行维护需求。

### 1.7 并网及孤岛防护

为满足随机性电源安全并网要求，需要随机性电源具备主动式防孤岛保护，逆变器主动式孤岛保护采用功率扰动、频率相位偏移等方法，在多逆变器并联，尤其多逆变器功率差异较大时，其检测可靠性降低。为防止逆变器主动式孤岛保护失效，在并网点加装检修人员手动操作的反孤岛装置。同时在并网点对并网开关设备进行改造，通常设置专用

并网开关，要求并网开关具备失压跳闸及检有压合闸功能。加装并网开关，还需要上一级开关，不然手动操作分闸时，有压合闸会再次合上，无法隔离。在有的场合还需要加装不同功能的保护控制装置，如：保护测控装置、并网接口装置、并离网切换装置、故障解列装置等，功能繁杂重复、维护不便。这些保护控制装置，控制方式不尽相同，难以实现配电网对多种随机性电源的灵活控制和管理。

### 1.8 渗透率及有效发电量

目前提出的考核分布式电源接入配电网利用的一个关键性指标——渗透率：DG 接入总容量与系统总负荷之比，即渗透率(Capacity Penetration, CP)。但是渗透率仅仅是从发电容量尺度考虑 DG 的利用，没有从可接入运行时间尺度考虑，如果渗透率很高，但有效运行时间很少，也就是说发电量很少，并不能代表新能源的有效利用。采用“发电量渗透率(Generating Capacity Penetration, GCP)”更合理，发电量渗透率为：DG 发电量与总负荷用电量之比。

采用 GCP 从容量及时间两个尺度考虑了 DG 的有效利用。即使目前采用 CP 考核 DG 的利用情况，

由于配电网架构的差异，标准很难提出 CP 的具体指标，可能在有些配电网能够实现 CP 的 100% 接入，有些配电网连 CP 的 10% 都达不到。这也是到目前为止，我国的标准还没有对 CP 给出具体指标的原因，同时国际上的标准也没有给出具体指标。如何保证接入配电网更长的有效运行时间，更多的有效发电量，是随机性电源更应该考虑的问题。

随机性电源存在的应用场景不同、功率转换设备规格多样、对外接口种类繁多、主电路拓扑差异、控制特性差异、运行维护困难等共性问题，造成即插即用的困难。

## 2 随机性电源云—层—端三层体系架构

系统考虑随机性电源接入配电网，从运行维护的方便性，调度控制可靠性、接入系统的即插即用角度出发，实现功率流及信息流的标准化。采用“金字塔” (Pyramid) 型的云—层—端三层体系架构，如图 4 所示。



图 4 云—层—端三层体系架构

Fig. 4 Cloud-layer-terminal three architecture

### 2.1 云—云运维

针对大量随机性电源分散接入配电网带来的运行、管理、维护分散等难题，随机性电源运行维护采用集中管理的方式，实现运行维护即插即用。集中化管理体现在：区域级的所有随机性电源的电气设备运行维护统一规划，采用同一个监控平台，分散的全景数据统一接入，所有运行设备运行状态在线监视，故障报警集中式处理。云运维架构如图 5 所示，随机性电源实时数据通过电力数据专网到云运维中心，云运维中心通过防火墙接互联网，通过移动终端实时远程访问区域级分散的随机性电源运行状况，其主要满足：1) 随机性电源实时数据及状态信息的监控；2) 大数据的统计分析；3) 故障预警及历史告警查询；4) 根据运行维护流程设计运行维

护工作任务和工作票，以统一规范的方式有序开展运行维护工作。

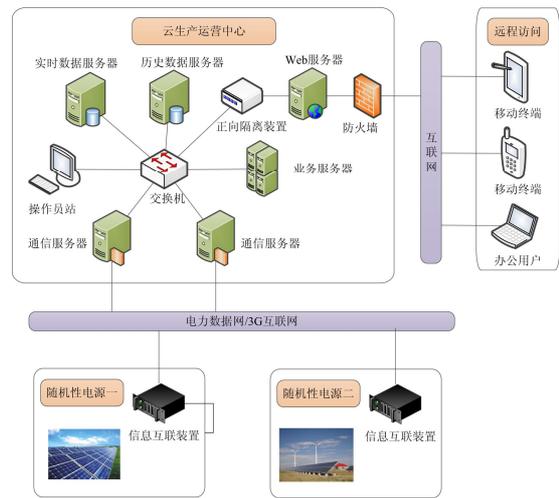


图 5 云运维架构

Fig. 5 Cloud operation and maintenance architecture

### 2.2 层—层控制

DG 接入配电网后，如何实现既要尽可能多地接纳新能源，又要保障配电网安全稳定运行，实现配电网的最佳经济运行，这本身就是相互矛盾的问题。从配电网角度出发，如何使随机性电源对配电网影响小，使随机性电源从无序到有序；从 DG 角度出发，从限制或固定接入到即插即用接入，使新能源发电效率最大化。为解决这一矛盾问题，设置一个控制层，也称“层控制中心”，其功能是实现有序计划发电控制，有序计划优化调度。层控制架构类似高压线路保护装置，如：高压线路保护装置按功能分为纵联、距离、零序、重合闸。层控制思想是按功能插件的形式植入控制层系统，仅仅是按照软件功能插件，根据应用场景需求，植入控制层系统，实现随机性电源控制的即插即用，如图 6(a)所示。

“层控制中心”可以作为配电网自动化系统的一个子系统，或植入配电网自动化系统，其有序控制按接入不同随机性电源类型的功能插件植入层控制系统，功能插件包括：光伏发电控制、风力发电控制、储能控制、充电机控制。层控制实现随机性电源的限制或固定接入到即插即用接入，从无序到有序控制，如图 6(b)是有序控制框图。输入是发电预测及负荷预测，从配电网角度考虑配电网安全、经济运行，从 DG 接入角度考虑发电效率最大化，输出是有序控制结果。通过调节 DG 出力及可控负荷(充电机)保证配电网安全；通过调节储能及可控负荷(充电机)提高 DG 接纳能力；通过调节 DG 及储能实现配电网经济运行。

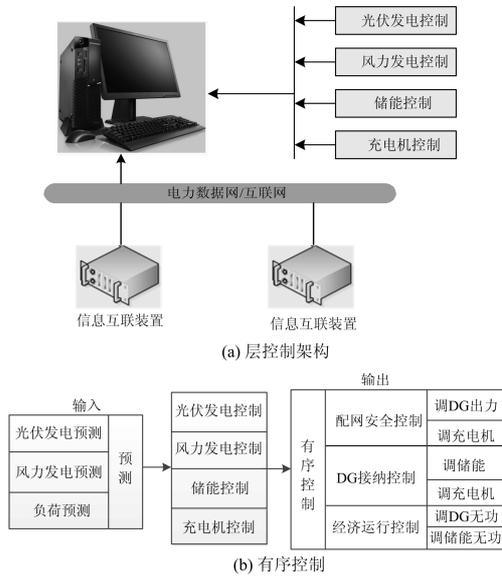


图 6 层控制架构及有序控制

Fig. 6 Layer control architecture and control in order

云—层—端三层体系架构中，随机性电源实时数据既汇总到云运维中心，又汇总到层控制中心，把云运维中心与层控制中心分别设置，主要根据功能定位不同。层控制中心是考虑一个配电网区域分布式发电控制，作为配电网自动化系统的一个子系统，云运维中心是考虑多个配电网区域分布式发电运行维护。

云运维中心与层控制中心是两个独立的系统，它们之间信息不进行交互，在实际工程应用中，可以采用云—端、层—端两层体系架构、云—层—端三层体系架构。采用云—端体系架构实现随机性电源运维即插即用，采用层—端体系架构实现随机性电源控制即插即用，采用云—层—端体系架构实现随机性电源运维、控制即插即用。

2.3 端—端互联

随机性电源接入配电网，电力电子设备实现能源转换，把所有的接入电气设备统称为电气设备端，如图 7。这些端设备包括：1) 功率转换设备：实现电源之间转换，包括逆变器、变流器、充电机等。功率转换设备采用可并联的功率模块，方便组成不同容量随机性电源，做到功率匹配即插即用。2) 安全并网装置：实现保护及安全隔离。满足电气互联，方便接入配电网，实现接入配电网即插即用。3) 信息互联装置：满足实时运行设备信息上送，实现控制及运维即插即用。

2.3.1 功率模块单元

a) 标准功率模块

包含光伏逆变、风机变流、储能变流、电动车充

电机等设备，这些设备实现 DC/DC 或 DC/AC 转换。DC/AC 功率模块采用三电平技术，采用强弱电一体可插拔端子，如图 8，实现应用场景即插即用。

功率模块规格采用 10 kW，20 kW，50 kW 三种不同容量的功率模块，10 kW 高度 2U，20 kW 高度 4U，50 kW 高度 6U 标准尺寸机箱，如图 9 所示，其规格如同我们日常使用的钱币组合，是用最少的组合，组成不同容量的逆变或变流设备，实现功率匹配即插即用。

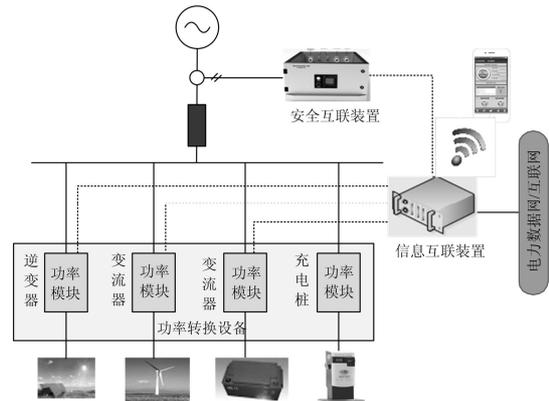


图 7 端互联架构

Fig. 7 Terminal interconnection architecture



图 8 强弱电一体可插拔端子

Fig. 8 HV/LV integrated plug terminal



图 9 10 kW、20 kW 和 50 kW 功率模块

Fig. 9 Power module of 10 kW、20 kW and 50 kW

b) 功率模块并联

功率模块并联是实现 DC/DC 并联及 DC/AC 并联。功率模块并联可根据功率需要，任意增减不同功率模块，组成不同容量的 DG，使 DG 标准化，运行维护方便，同时模块并联实现源荷功率均分，降低模块内部功率开关管的电流应力，提高 DG 使用寿命。

### c) 高效率三电平

前面介绍了传统的两电平及发展方向的三电平,采用直流电压利用率高,开关损耗小,整机效率高的三电平技术。“三电平”技术所需的开关频率较两电平更低,输出接近正弦波,所需的电抗器体积小,易于模块化,设备的重量体积都更小,便于运输维护。

### 2.3.2 安全并网装置

分布式电源接入配电网的互联,包括互联设备及互联系统,也称为并网。互联设备是接入的单个或多个逆变器互联部分;互联系统是完成互联功能的控制系统,包括:系统控制、系统保护、自动化通信、同期计量等装置。设置安全并网装置,集成开关、保护、测控、通信等功能。实现分布式电源接入的主动式孤岛、自动安全并网。

#### a) 主动式孤岛

采用不依赖于 DG 的孤岛主动式检测,其方法是采用 50 W 小功率模块,20 Hz 电源注入方式,实现 100%主动式孤岛保护,该方法是借鉴发电机保护的外加 20 Hz 电源实现定子接地保护检测,不依赖 DG,不依赖通信,在并网点独立实现主动式孤岛检测,确保 DG 接入安全性。

#### b) 自动安全并网

安全并网装置为保证安全,在电网侧有压,内部开关根据具体情况决定是否合闸,主要是区分手动分闸及故障自动分闸情况。手动分闸,闭锁合闸, DG 不能并网发电,确保手动分闸成功;故障时失压,自动分闸,故障清除后,网侧有压,自动合闸,确保 DG 并网发电。

### 2.3.3 信息互联装置

分布式电源接入配电网需要相应的互联设备,互联设备信息众多,规约类型多样。信息互联装置不仅实现 DG 的通信汇集,其信息接口还实现电池管理系统(BMS)等外部智能设备的接入与信息转发,支持 IEC104、IEC61850、Modbus 规约,支持串口、以太网通信方式采集数据。这些数据通过以太网口上送至层控制中心及云运维控制中心,实现信息互联即插即用。

信息互联技术特征是“随机性电源+互联网”,信息互联装置的另一功能是 Wi-Fi 及二维码识别。通过移动终端扫描电气接入设备二维码,实现设备调试整定,运行状态监视。采用移动终端对电气设备调试整定,实现了非接触式的安装、调试、运维检查、诊断,更能保证人身设备的安全,对安装在高处的电气设备,如柱上测控终端设备,免除了爬高、接触强电风险,更安全,更有优势。

## 3 最大发电量渗透率控制特性

DG 接入配电网因过电压而导致渗透率低,采用发电量渗透率能更好体现 DG 有效利用水平, DG 工作在 P/Q 模式时,采用 P/U 下垂调节方法<sup>[16]</sup>;解决由于 DG 发出有功过多引起电压升高,使 DG 退出运行,不能有效发电问题,避免 DG 因过电压而退出运行,电压恢复正常后,自动恢复 DG 正常运行特性,保证 DG 更多时间接入,发电量最大,发电量渗透率最大,实现按最大发电量渗透率即插即用。

P/U 下垂调节按照如下公式进行调节。

$$P_{\text{limit}} = P_{\text{ref}} - |k_u| \Delta U, \quad U_{\text{pcc}} \geq 1.1U_N \quad (1)$$

$$\Delta U = U_{\text{pcc}} - 1.1 \times U_N \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{limit}}$  为调节后功率限值;  $P_{\text{ref}}$  为当前功率输出;  $U_{\text{pcc}}$  为 DG 接入点电压;  $k_u$  为下垂调节系数。

对于  $k_u$  值选取,根据式(2)中  $\Delta U$  大小选取不同的值,采用多段折线,  $\Delta U$  越大,  $k_u$  取值越大,保证 DG 在表 1 的电压异常响应在要求时间内调节到电压正常范围,不让 DG 因电压异常脱网停机。

## 4 小结

(1) 分析了分布式发电到分布式电源及微电网接入配电网共性问题,把光伏发电、风力发电、储能装置、电动汽车统一按“随机性电源”考虑。

(2) 从应用场景专用设计,工程应用功率匹配,对外接口端子,两电平与三电平拓扑结构,过电压异常响应,监视、控制、运维,并网及孤岛防护,渗透率及有效发电量渗透率等方面,分析随机性电源接入配电网存在的问题。

(3) 从实现随机性电源即插即用出发,介绍了随机性电源的云一层一端三层体系架构:云运维实现运行维护即插即用,层控制实现有序控制即插即用,端互联实现应用场景、工程应用功率匹配、安全并网、信息互联、最大发电量渗透率接入配电网的即插即用。

(4) 层控制借用继电保护装置思路,按功能插件的形式,根据应用场景需求,植入控制层系统的层控制架构。

(5) 端互联设置功率模块单元、安全并网装置、信息互联装置,实现功率模块并联、20 Hz 电源注入式主动式孤岛保护、随机性电源+互联网、最大发电量渗透率控制。

## 参考文献

[1] 宋卓然,陈国龙,赫鑫,等.光伏发电的发展及其对电网

- 规划的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 92-96.  
SONG Zhuoran, CHEN Guolong, HE Xin, et al. Study on development of PV generation and its impacts on distribution network planning[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(7): 92-96.
- [2] 康海云, 杭乃善, 卢桥, 等. 分布式光伏发电在智能电网中的作用分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(10): 86-90.  
KANG Haiyun, HANG Naishan, LU Qiao, et al. Role of distributed photovoltaic generation in smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(10): 86-90.
- [3] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.  
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [4] 李瑞生. 一种基于虚拟节点网络拓扑结构适用于架空线路主动配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 70-75.  
LI Ruisheng. An aerial line active distribution network pilot protection scheme based on topology of virtual node[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 70-75.
- [5] 李瑞生. 适用主动配电网的差动保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 104-109.  
LI Ruisheng. A differential protection scheme to apply to active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 104-109.
- [6] 曾博, 刘念, 张玉莹, 等. 促进间歇性分布式电源高效利用的主动配电网双层场景规划方法[J]. 电工技术学报, 2015, 28(9): 155-171.  
ZENG Bo, LIU Nian, ZHANG Yuying, et al. Bi-level scenario programming of active distribution network for promoting intermittent distributed generation utilization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 28(9): 155-171.
- [7] 杨珺, 张建成, 桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1209-1216.  
YANG Jun, ZHANG Jiancheng, GUI Xun. Capacity optimization of hybrid energy storage system in grid-connected wind and PV power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1209-1216.
- [8] 朱勇, 杨京燕, 高领军, 等. 含异步风力发电机的配电网无功优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 80-84.  
ZHU Yong, YANG Jingyan, GAO Lingjun, et al. Research on optimal reactive power planning for distribution network containing asynchronous wind power generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 80-84.
- [9] 李建林, 田立亭, 李春来. 储能联合可再生能源分布式并网发电关键技术[J]. 电气应用, 2015, 4(9): 28-33.
- [10] 陶琼, 吴在军, 程军照, 等. 含光伏阵列及燃料电池的微网建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 89-92.  
TAO Qiong, WU Zaijun, CHENG Junzhao, et al. Modeling and simulation of microgrid containing photovoltaic array and fuel cell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 89-92.
- [11] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-32.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-32.
- [12] 叶曙光, 胡蕊, 刘钊, 等. 基于LCL滤波器的双向储能变流器研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 88-92.  
YE Shuguang, HU Rui, LIU Zhao, et al. Bi-directional power conversion system based on LCL filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 88-92.
- [13] 徐军, 王锬, 翟登辉, 等. 一种基于新型载波同相层叠PWM方法的飞跨电容型光伏发电并网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 134-139.  
XU Jun, WANG Kun, ZHAI Denghui, et al. Grid-connected photovoltaic power generation technology with flying capacitor inverter based on novel carrier-based disposition PWM method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 134-139.
- [14] 易映萍, 姚为正, 刘普, 等. 基于可再生能源三电平并网变流器的研制[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 93-94.  
YI Yingping, YAO Weizheng, LIU Pu, et al. Development of three-level grid-connected converter based on renewable energy[J]. Power Electronics, 2010, 44(6): 93-94.
- [15] 陈良亮, 张蓓蓓, 周斌, 等. 电动汽车非车载充电机充电模块的研制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 81-84.  
CHEN Liangliang, ZHANG Beibei, ZHOU Bin, et al. Development of charging module of off-board charger for electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 81-84.
- [16] 李瑞生, 翟登辉. 光伏DG接入配电网及微电网的过电压自动调节方法研究[C] // 中国智能电网学术研讨会, 南京, 2015: 156-161.  
LI Ruisheng, ZHAI Denghui. Research on the over-voltage automatic adjustment method of distributed photovoltaic sources accessing to distribution network or microgrid[C] // China Smart Grid Symposium, Nanjing, 2015: 156-161.

收稿日期: 2015-06-19; 修回日期: 2015-10-26

作者简介:

李瑞生(1966-), 男, 硕士, 教授级工程师, 研究方向为继电保护、分布式发电接入及微电网稳定控制运行等。E-mail: ruishengl@139.com

(编辑 葛艳娜)