

某智能小区微电网控制系统的设计与研究

文/中国建筑设计研究院有限公司 严诗恬

以某智能小区的微电网设计为例，搭建了一个具有分层结构的微电网控制系统，采用了一种快速的工业以太网技术（EtherCAT）用于微电网控制系统的通信，并通过合理的控制决策成功的实现了微电网孤岛与并网之间的平滑切换，试验证明此控制系统具有良好的实时性和可靠性。

随着世界经济的发展以及电网规模的不断扩大，人们对电网的依赖程度越来越大，使得电网运行难度也越来越大。近几年来，世界范围内连续发生的自然灾害及电网事故，使大电网的种种弊端都充分地暴露出来，为了确保社会的安全稳定，各国都制定相关政策鼓励发展可再生能源（如光伏、风能和燃料电池等）的分布式发电。分布式发电具有发电方式灵活，而且可以与环境兼容等优点，然而对于大电网而言，分布式发电属于不可控系统，为了协调分布式电源与大电网之间的矛盾，提出了微电网的概念。

所谓微电网，是将微型电源、储能装置以及一些控制装置结合起来组成的一个小型的可控单元。它满足用户对供电质量和供电安全等方面的需要，可以向用户提供电能和热能。微电网与大电网之间的并网只针对公共连接点，而不针对具体的微型电源，体现了“即插即用”的特点，从而解决了在配电网中大量分布式电源的接入问题，充分地发挥了分布式发电设备的能力，也提高了整个电网运行的效率与稳定性。微电网的突出优点集中体现在如下几个方面：

1) 微电网“即插即用”的工作方式相对于大电网而言是一个单一可控的工作单元。微电网系统与大电网之间通过公共连接点（Point of Common Coupling, PCC）进行连接，从而有效

地解决了多个分布式电源之间互联以及分别接入大电网的问题，大大提高了微电网的可靠性。

2) 微电网系统可以实现对本地用户冷、热、电三联供的服务功能，因而大大提高了分布式电源（DG）的综合使用效率。此外，通过对微电源的控制，微电网系统可以实现对大电网的能量支持和削峰填谷等多种功能。

3) 微电网系统在一定程度上弥补了大电网可靠性、稳定性不足的缺点，同时，可以满足用户需求的多样化。

4) 微电网系统中大量采用清洁能源，例如：风力发电、光伏发电等，有利于节能环保和可持续发展。同时，由于分布式电源距离负荷较近，减少了电网投资成本和线路损耗，从而大大提高了能源利用率。

综上所述，微电网在使用过程中具有双重角色，即：对于大电网而言，该系统作为一个独立受控单元，接受大电网的调度和管理，并能在很短时间内做出响应；而对于用户而言，该系统是一个可定制的电源，能够满足用户对电能可靠性、安全性及多样性的需求。以发展的眼光来看，微电网将会成为电力系统一个重要的组成部分。未来的配电网系统将由传统的供电网络和微电网结合而成，且形成一种类似于互联网一样的结构。

本文以某智能小区为例,对微电网进行分层管理,采用EtherCAT的工业以太网技术进行通信,大大地提高了系统通信的实时性,并通过TwinCAT平台搭建了微电网的控制系统。试验证明,能在1 s内实现微电网孤网并网之间的快速平滑切换。本文第二部分主要介绍了微电网的控制系统模式;第三部分主要介绍了微电网控制系统的分层结构;第四部分主要介绍了微电网控制系统的设计方案;第五部分通过实现验证了系统设计的可行性;最后对全文进行了总结并提出了需要进一步解决的问题。

微电网控制系统模式

微电网可以在并网和孤网两种模式下运行。在正常情况下,微电网与大电网并网运行,在微电网自身发电能力较强时可以向大电网提供多余的电能;当微电网发电能力不足时,可以吸收大电网的电能来补充能量。在电网发生故障或电能质量不满足要求的情况下,微电网与大电网断开,运行在孤网模式,由分布式电源向微电网的负荷供电,从而保证了系统的不间断供电。

对于微电网的控制系统而言,它的基本要求是平滑自主的实现与主网的分离、并列或是两者的过渡转化。具体地讲,就是微电网控制系统必须保证:①任意的微型电源的接入不对系统造成影响;②调节微电网内的馈线潮流,对无功和有功进行独立解耦控制;③能自主地判断微电网运行的方式,通过采集电网事件中的信息,例如故障、停电和电压下降等等自主进行调节;④孤网运行时,确保每个微型电源能快速相应,分担用户负荷。由于微电网控制是一个动态的调节过程,因此,通信的实时性问题成为微电网控制系统中的一个关键问题。

微电网控制系统的分层结构优化

微电网控制系统不仅涉及电力方面的知识,还包括计算机、通信和结构等,这些知识互相融合才能构成微电网控制系统。因此,系统结构优化是控制系统中的一个很关键的因素。本文将微电网控制系统分为三层:物理层、控制层和管理层,如图1所示。

1. 物理层

物理层主要由一些硬件和微型电源的控制器组成。包括微型电源、储能、各种负载、传感

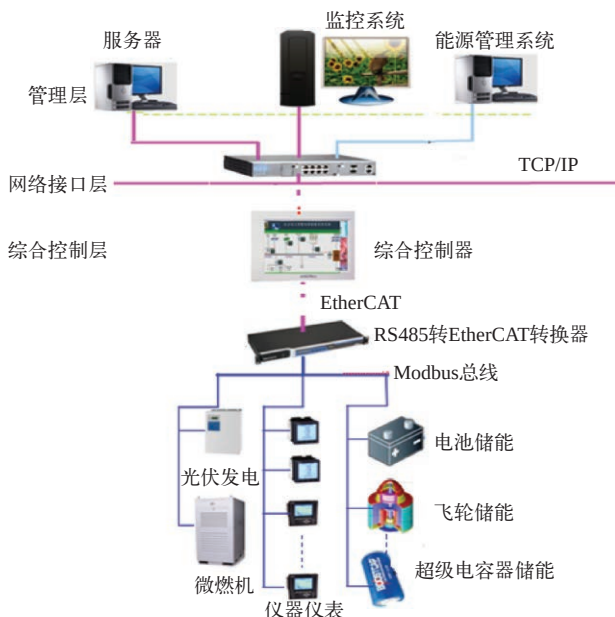


图1 微电网分层结构示意图

器、逆变器和保护装置等。物理层主要是向控制层提供一些状态信息值,例如电压、频率、功率、MS发电输出和负载消耗情况等。这一层主要响应控制层发出的命令,主要是对电源和一些非重要负载的控制。

2. 控制层

控制层的主要作用是发送控制命令到物理层,采集微电网执行机构的状态值,将信息反馈到管理层。在这一层,主要是从物理层采集数据,通过这些数据处理来控制开关状态,从而保证系统的可靠性和有效性。整个控制系统的控制速度在这一层集中体现。

3. 管理层

管理层的主要作用是监视所有开关的状态以及微电网运行的模式,根据用户的需要可以下发命令到控制层,从而控制开关的状态,或自行确定微电网的控制模式。

微电网控制系统的设计方案

微电网的控制系统必须保证,在并网和孤网运行方式下,系统都能稳定安全运行。当与电网隔离时,控制系统必须有能力快速地控制局部电压和频率,提供或者吸收电源或负荷之间的暂时功率差额,保护微电网。

对于大电网来说,微电网可以作为一个可控的模块化单元,提供满足用户需要的负荷,要实现这些功能必须具有良好的控制系统。目前在微电网的控制系统中,大多数采用的是PLC作为中央

控制器。它易于设置和编程，运行可预估，甚至在恶劣的生产环境下还可以保持正常的工作，所以在微电网现场得到了广泛的应用。

在本控制系统中，主要采用了Beckhoff的TwinCAT PLC作为主控制器。TwinCAT软件系统可将任何兼容PC转换成实时控制器。系统集成“远程”连接特性根据操作资源的要求，TwinCAT PLC程序可运行在PC上或Beckhoff总线端子模块控制器中，简称微型PLC。“报文路由器”负责通过TCP/IP接口管理和分配系统中的所有报文。PC系统可通过TCP/IP相互连接；总线端子模块控制器通过串行接口和现场总线（Lightbus、PROFIBUS DP、RS 232、RS 485和以太网TCP/IP）集成。它比普通硬件PLC处理语句的速度快，并且在同一台PC机中，可以同时执行四组PLC任务。如图2、图3所示，图2对比了TwinCAT PLC与硬件PLC执行1000条PLC命令所需的时间；图3显示了TwinCAT PLC的总体结构。

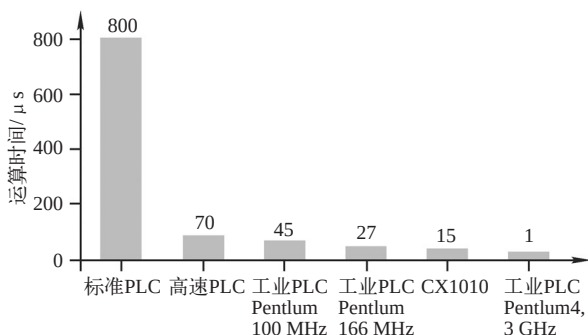


图2 硬件PLC与TwinCAT PLC执行1000条PLC命令所需时间比较

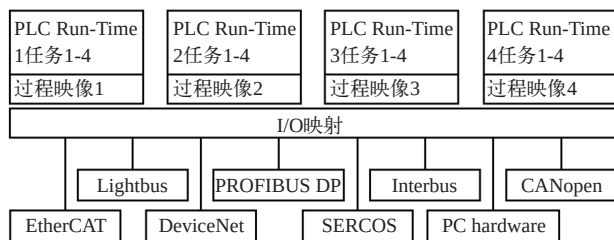


图3 TwinCAT PLC 结构

1. 系统原理图

在本系统中，微电网主要由中央控制器、服务器、分布式电源、储能元件、电力电子器件、开关、负载和仪器仪表等构成。

如图4所示，本系统中，分布式能源主要由光伏和发电机组组成。储能装置采用的是蓄电池。

电力电子器件包括有并网逆变器、离网逆变器、三相逆变器和单相逆变器。并网逆变器是指母线上有其他电源作为基准电源时，并网逆变器可以投入使用。离网逆变器是指在母线上没有其他电源，由离网逆变器所带电源提供标准电源。在每个回路中均安装了一些仪器仪表，用来采集所在回路的电量信息。在负载侧，根据负荷的重要程度将所有负载分成一级负荷、二级负荷和三级负荷。一级负荷是指不论微电网处于并网状态还是离网状态，必须保证不间断供电。二级负荷和三级负荷可以根据具体情况进行投切。为了保证一级负荷的不间断供电，采用两路电源进行供电。光伏和蓄电池组的单独供电回路用来确保一级负荷在孤网状态下也能正常使用。

2. 微电网系统控制器主要工作原理

1) 服务器。服务器用于对整个微电网的监控，从监控画面上可以看出每一路开关的状态、电源以及负荷的一些电量信息，包括有功、无功、电压、电流和频率等，并将这些电量信息存储到历史数据库，可以通过图形的方式进行显示。从监控系统中也可以控制每个断路器的分合。监控系统上显示的进线回路的电压、电流信息如图5、图6所示。

2) 工控机。工控机作为系统的主控制器用于对整个微电网的控制。里面安装了TwinCAT PLC软件，可以实现PLC的所有功能。在TwinCAT PLC中，主要实现两部分的功能：①用于采集所有设备的电量信息以及开关的状态，并将这些信息传递给服务器的监控系统；②根据各路开关状态以及电量信息判断微电网运行模式。

3. 控制过程

本控制系统主要实现微电网并网和孤网之间的平滑切换。当检测到大电网发生故障或其电能质量不符合系统标准的情况下，PCC断开，微电网处于孤网状态，所有的负荷都由微型电源供电。需要由微型电源提供基准电压和频率，所有的电源在工作过程中需要与基准电源进行同期，在电压、频率等能满足要求时才能同时使用。如果当前系统电源的电量能满足所有负荷的需要，则保证所有负荷都正常供电；如果系统电源能量不能满足所有负荷的供电需要，则可以将负荷按重要等级进行划分，优先保证重要负荷的供电。当充电桩为三级负荷且功率过大，在供电能力不足时可以将此负荷切断，保证其他负荷能

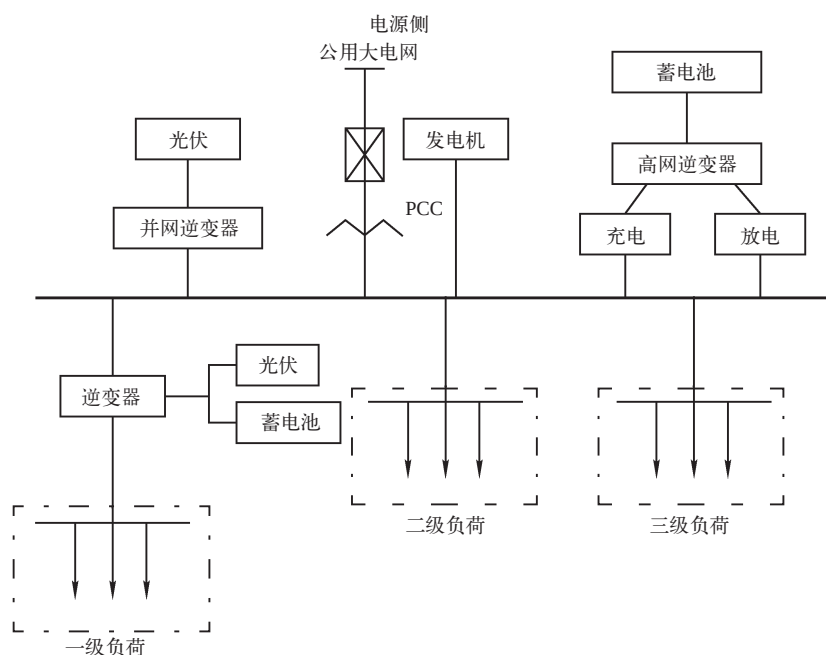


图4 微电网控制系统原理图

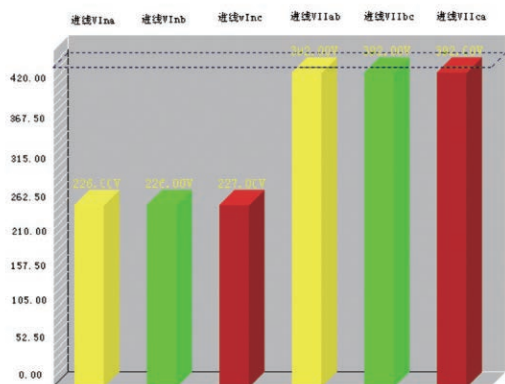


图5 进线回路电压棒图

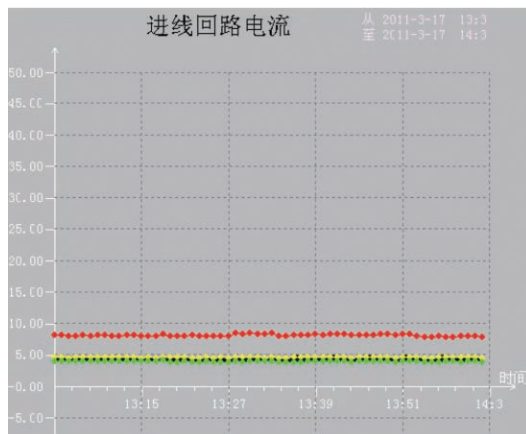


图6 进线回路电流曲线图

正常使用。在电源的供电能力大于负荷的需求时，可以考虑选择部分电源供电。电源种类一共

有三种、光伏、蓄电池和发电机。如果在阳光充裕时，光伏的发电量较大，可以选择用光伏作为主要电源，如果光伏的发电量足够大可以在给负载供电的同时给蓄电池进行充电。如果在晚上微电网处于孤网状态，光伏的发电量几乎为0，则必须选择用发电机和蓄电池作为主要电源。当进线开关与PCC开关处于分位，微电网控制系统运行在孤网模式，发电机处于停止运行状态，一级负荷一方面由自身回路上的光伏与蓄电池供电；另一方面由电源侧光伏与蓄电池供电。其他负荷由电源侧光伏与蓄电池供电。

在系统转入孤网状态下时，由于电压和频率不稳定，需要对系统的有功功率和无功功率分别进行考虑，系统电源输出的总有功功率必须等于系统总消耗的有功功率。如果系统无功功率过大，则需要对系统进行无功补偿，本系统中是采用投切电容器的方式进行无功补偿的。

当检测到大电网恢复供电或电能质量符合标准情况下，微电网从孤网转成并网。此时，由大电网提供标准电源，微型电源可以选择性工作，光伏在与大电网同期上之后可以正常工作，蓄电池可以进行充电或停止放电，从经济的角度考虑，蓄电池可以在夜间进行充电。在所有电源都能正常供电的情况下，恢复所有负荷的供电。当进线开关与PCC开关处于合位，微电网控制系统运行在并网模式，发电机处于运行状态。

试验数据分析

为了验证本控制系统的可行性与实时性，一共拟定了两个试验。并对试验数据进行了分析。

1. EtherCAT通信试验

为了验证本系统的实时性，特拟定了一个对比试验。在采集每个回路电量信息的过程中，可以采用两种方式。第一种方式是TwinCAT PLC控制器直接通过EtherCAT通信模块采集各路电量信息。在控制器与通信模块之间通过EtherCAT进行通信。第二种是SCADA系统通过串口采集各路仪器仪表的电量信息。在SCADA与仪器仪表之间通过RS 485总线进行通信。试验数据显示，通过串口采集到的数据延时在2 s左右，而通过EtherCAT通信模块采集到的电量信息可以在毫秒级，数据刷新的周期在毫秒以上。试验数据表明EtherCAT的通信速度非常快，能有效地解决在微电网通信过程中的实时性问题。

2. 孤网与并网之间的切换试验

为了检测本控制系统能否实现并网和孤网之间的平滑转换，以及微电网从并网转成孤网微型电源稳定给负荷供电的时间和微电网从孤网到并网时所有负载的恢复供电的时间。

在市网正常供电的情况下，一、二、三级负荷正常工作，发电机处于工作状态。此时，断开进线开关，从而PCC开关断开，整个系统处于孤网状态。在检测到电能质量满足要求的情况下，确保一级负荷不能断电，通过计算或分布电源的发电情况与负载的消耗情况可以选择性切掉部分二、三级负荷。并根据采集的无功功率的大小判断是否投切电容器组。在并网成功转向孤网之后，合上进线开关，当检测到电能质量满足要求的情况下，合上PCC开关，系统恢复并网状态。离网逆变器断开，在所有电源与标准电源同期上之后可以恢复所有负荷的正常供电。并网逆变器上所接微型电源可以投入使用。

试验结果表明：在PCC断开时，保护装置立刻切入孤网模式，所有并网逆变器迅速断开。此时，光伏和发电机同时工作，三级负荷全部切掉，二级负荷里的地源热泵被切掉，其他负荷均能正常工作。一级负荷一直由另外一组光伏和蓄电池进行供电，处于不间断供电的状态。在1 s内，三级负荷中的附属房间照明恢复供电。在5 s内，一组电容器投入使用。试验数据如表1所示。

当系统处于稳态的状态下，合上进线开关，

表1 并网转孤网试验数据

开关动作	动作时间/ms
保护投入	100
电源投入	500
切负荷	100
投负荷	200

当进线回路上的保护装置检测到电能质量符合要求时，PCC开关自动投入，保护装置处于并网状态，离网逆变器迅速断开。光伏和发电机与标准电源进行同期，同期完成后继续保持发电状态。所有断开的二、三级负荷均恢复供电，蓄电池组放电回路断开，充电回路接入，处于充电状态。二、三级负荷在3 s内恢复供电。试验数据如表2所示。

表2 孤网转并网试验数据

开关动作	动作时间/ms
保护投入	100
切并网逆变器	300
电源同期	2 000
投所切负荷	500

通过观察试验现象，可说明本系统能平滑地从并网转成孤网。分布式电源与标准电源能快速同期，并能提供稳定的电压、电流。在并网转入孤网的过程中，首先切断了三级负荷的供电回路，一级负荷采用2组回路给其供电，从而保证了一级负荷的不间断供电。在保证二级负载能正常工作的情况下，根据分布式电源的发电情况以及三级负荷的实际消耗功率来判断是否恢复对三级负荷的供电。通过试验数据显示，整个过程可以在1 s内完成，试验成功地验证了本微电网系统的可行性和快速性。

结束语

近年来微电网技术引起全世界的广泛关注，一些理论知识和相关技术的发展已经到达一定水平，将这些理论依据运用在实际工程中成为了现阶段微电网发展的主要问题。本文以某示范工程为例，成功地搭建了微电网控制系统，并通过实验证明了此控制系统的可靠性和快速性。在搭建系统的过程中，出现了一些问题需要进一步解决。

1) 分布式电源的形式多样，如何对这些分布式电源进行合理的协调控制是一个很关键的问题。

2) 由于微电网控制系统组成元件较多，因此设备之间通信的实时性以及规约转换的问题需要进一步优化。EA