

新能源友好接入配电网适应性分析

李 群，袁晓冬，李 强

(江苏省电力公司电力科学研究院，江苏 南京 211103)

摘 要：本文从规划设计、安全接入、运行与检修、计量安全等方面详细分析了新能源接入配电网目前普遍存在的问题；提出了完善新能源接入典型设计、开展接入配电网保护校核、加强反孤岛技术应用、推广并网接口技术、建立分布式光伏发电窃电监管系统、规范统一标准体系等技术和措施，为新能源友好接入配电网提供参考。

关键词：新能源；分布式光伏；配电网；友好接入；适应性

0 引言

为适应现代经济社会的发展，满足安全、可靠、经济及智能化的供电需求，配电网正处于向智能配电网转型和升级的重要阶段。与此同时，随着环境污染的日益加剧、新能源发电技术的成熟和配套鼓励政策的推动，新能源发电进入快速发展期。目前，新能源发电的形式主要有风力发电、光伏发电、生物质发电、余热余气余压综合利用发电、地热发电、海洋能发电等^[1-8]。

今后一段时间内，我国新能源接入配电网的主要增长形式将以分布式光伏为主。当配电网中分布式光伏渗透率达到一定比例时将会对配电网规划设计、安全接入、运行与检修、计量安全等方面产生重要影响。目前赖以参照的标准规范、典型设计、方法措施暂难以系统性的解决上述方面的影响。

本文是在对国内外分布式光伏现状调研、试验分析、涉网服务、专题研究的基础上，分析了当前分布式光伏接入配电网面临的主要问题，针对性地提出了解决措施（如图 1 所示），为分布式光伏友好接入配电网提供参考。

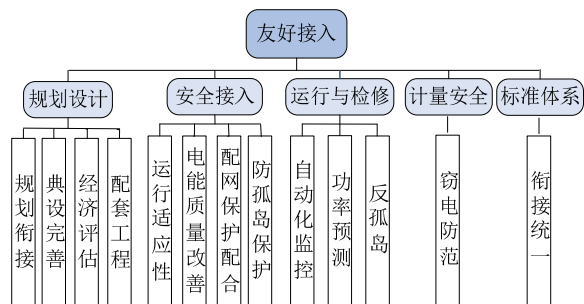


图 1 分布式光伏友好接入配电网的综合措施

本文是在对国内外分布式光伏现状调研、试验

分析、涉网服务、专题研究的基础上，分析了当前分布式光伏接入配电网面临的主要问题，针对性地提出了解决措施（如图 1 所示），为分布式光伏友好接入配电网提供参考。

1 规划设计问题及对策

在规划设计层面，分布式光伏发展的问题主要集中在光伏发电与配电网规划的衔接性、光伏发电经济性、接入设计及配套工程建设等方面。

1.1 规划衔接性

当前配电网通常为环网结构、辐射状运行，配电网规划主要以满足用户的供电需求为目标。大量分布式光伏的接入，会显著改变配电网等效用电需求，进一步加大供电负荷的不确定性，进而导致配电网规划中配变容量确定、线路选择难度加大。

在配电网的一次网架规划中，应充分考虑大规模分布式光伏接入需求，计及大规模分布式电源接入对配电网负荷需求、潮流分布、运行方式、电压控制等方面的影响，规划合理的配电网网架方案，提升配电网对大规模分布式发电接纳的适应性。在配电网规划的二次方面，尤其是在配电自动化系统中，应当预留分布式电源监控、通讯等信息接口，满足分布式电源和配电网信息交互需求，实现对分布式电源的分级合理监控，相关保护配置应考虑分布式电源的兼容，提升配电网对分布式电源的适应性水平。

1.2 经济性分析

分布式光伏的规模化发展是建立在合理的经济可行性基础上，国家发改委于 2013 年正式出台的关于分布式光伏的补贴政策（2013 年 9 月 1 日实行）

极大提升了分布式光伏的经济性，将对分布式光伏的规模化发展起到积极的推动作用。

国内近期光伏发电建设的成本约 9 元/瓦。以某装机容量为 5kW 的户用型分布式光伏为例，初始投资约 4.5 万元；综合考虑江苏光照资源情况，按照年等效发电利用小时数 1000 计算，该 5kW 光伏年发电量约 5000kWh。经济性分析如下：

方案一：全部上网。根据光伏补贴政策，该光伏所发的 5000 千瓦时均能享受 0.42 元/千瓦时的补贴，约 2100 元；同时，该用户所发 5000 千瓦时售电价享受脱硫燃煤电厂标杆电价 0.455 元/千瓦时，约 2275 元；总计年收益约为 4375 元，则投资回收期约 10.29 年。

方案二：自发自用、余电上网。假定该家庭每月用电约 200 千瓦时，则该家庭年自发自用电量约 2400 千瓦时，剩余 2600 千瓦时余电上网。根据补贴政策，该光伏所发的 5000 千瓦时均能享受 0.42 元/千瓦时的补贴，约 2100 元；自发自用的 2400 千瓦时能够减少家庭够电费用约 1248 元（0.52 元/千瓦时）；余电上网享受脱硫燃煤电厂标杆电价 0.455 元/千瓦时，年收益约 1183 元；则该光伏年总收益约 4562 元，投资回收期 9.93 年。

若用户是一般工商业和高耗能工商业用户，假定对应的用电电价分别为 0.85 元/千瓦时、1.15 元/千瓦时，对应的投资回收期分别缩短为 8.35 年、7.37 年。

表 1 不同上网方式经济性比较

上网方式	全部上网	自发自用、余电上网
用户用电电价/(元/kWh)	——	0.52 0.85 1.15
发电量/kWh	——	5000
自用电费/元	——	1248 2040 2760
上网电费/元	2275	1183
投资回收期/年	10.29	9.93 8.35 7.37

注：分布式光伏还存在全部自用方式，用户发电大于用电将导致弃光，降低经济性，若无额外补贴，用户通常不会选择该形式。

若无政策性补贴，江苏光伏发电的投资回收期一般在 15 年以上。通过上表分析，可以看出：国家发改委出台的补贴政策能够大大缩短分布式光伏投资回收期，有效改善分布式光伏的经济可行性，推动分布式光伏的发展。在上网方式选择方面，全部上网方式的经济性略差，自发自用余电上网将成为用户的优选方案。

1.3 典型设计

在接入设计方面，主要依据《分布式光伏发电接入系统典型设计》开展接入方案设计，共 13 个

典型方案，其中单点接入典型设计方案 8 个、组合接入典型设计方案 5 个。这些典型设计方案基本能够满足光伏发电接入设计需求，但在实际接入设计中，还是碰到一些具体问题，在典型设计方案中找不到适用案例。如用户自用电的电压等级低于分布式光伏接入的电压等级（220V 用户的光伏采用 380V 并网，380V 用户的光伏采用 10kV 并网），该分布式电源与用户在同一场所，属于自发自用余电上网型用户。由于电压等级限制，无法就地接入用户内部，用户类型由自发自用余电上网变为全部上网，经济效益受到一定影响。

应根据实际接入设计中碰到的问题，对《分布式光伏发电接入系统典型设计》或相关的管理规定中增补针对具体问题的说明，满足实际工程应用中分布式光伏接入设计需求。

1.4 工程配套建设

在接入电网配套工程建设方面，根据国网公司《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》，由电网公司负责配电接入工程建设。目前，地市公司在开展配套工程建设方面，存在的问题主要有物资申请缺乏对应条目，采购周期漫长，导致配套工程难以与光伏发电工程本体同步建成，造成已建成的分布式光伏发电难以同步并网运行。

为更好地服务分布式电源接入，需要加快配套工程建设的进度，从立项、设计、招投标、工程建设等方面加强配套工程建设的速度，对接入工程进行打包，提高配套工程建设的进度。同时，在配套物资采购方面，需要对申报物资数据库进行完善，提高物资申报和采购流程效率，确保分布式光伏并网工程与光伏本体能够同步建成。

2 安全接入问题及对策

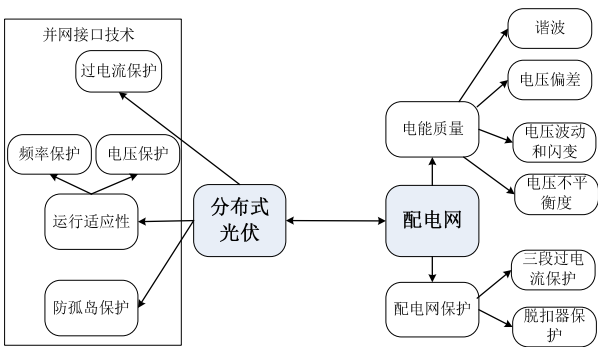


图 2 分布式光伏发电安全接入相关因素

分布式光伏能够在配电网中得到有效接纳，必

须解决好安全接入问题。目前对于分布式光伏发电的安全接入问题主要包括：运行适应性、接入后电能质量、配电网继电保护、光伏防孤岛保护等。见图 2。

2.1 运行适应性

当接入配电网运行条件发生较大变化时，可能对分布式光伏并网设备产生一定危害，因此当电网运行条件发生变化时，分布式光伏必须采取相应保护措施脱离电网，分布式光伏对电网运行的适应性主要包括电压适应性和频率适应性。

对于运行适应性问题主要通过完善光伏发电本身保护的方式来进行，需配置完善的电压和频率保护，过电流保护，必要时配置逆功率保护，并严格按照相关标准进行整定，确保相关光伏发电自身的可靠性。

2.2 电能质量

分布式光伏通过逆变器并入电网，易产生谐波、三相不平衡；同时输出功率波动易造成电网电压波动和闪变，劣化配电网电能质量，影响周边用电负荷的正常工作。根据江苏公司 2013 年已完成的 10 座光伏电站并网点电能质量检测（其中 110kV 电压等级并网 3 座，10kV 和 20kV 电压等级并网 7 座）及近 10 个分布式光伏并网点的检测，虽然并网点频率、谐波、三相不平衡度、长时间电压闪变等电能质量各项指标均满足国标要求，但随着光伏渗透率的不断增加，造成的电能质量问题必须引起重视。光伏并网电能质量问题主要通过加强入网检测和基于在线监测的技术监督，一旦发现指标越限，应要求光伏电站安装电能质量治理设备，如有源滤波器等。

2.3 配电网继电保护

光伏发电接入配电网后将会改变配电网的拓扑结构，其对配电网继电保护的影响主要取决于配电网短路时光伏逆变器注入的短路电流。由于发生短路时保护逆变器的需要，光伏逆变器在控制系统的电流内环中一般都设置限幅环节，通过对大量逆变器开展短路试验，发现逆变器出口三相短路电流均能控制在 1.5 倍的额定电流以内。

某典型光伏逆变器出口三相短路试验实测电流波形如图 3 实线所示。由图 3 (a) 可以看出，(1) 稳态短路电流约为额定电流的 1.2 至 1.3 倍；(2) 在短路瞬间，会产生一个额定电流 2 至 4 倍的暂态尖峰电流。图 3 (b) 是对上图尖峰电流部分的局部放大图，由图 3 (b) 可以看出，高频暂态尖峰电流持

续几百微秒，对保护没有影响。

进一步的研究分析还表明：在配网中光伏发电与上级主变容量比例在 20% 以下时，一般不需要调整配网继电保护定值；与上级主变容量比例达到 20% 以上时，需要根据实际配电网短路故障情况调整继电保护的定值。

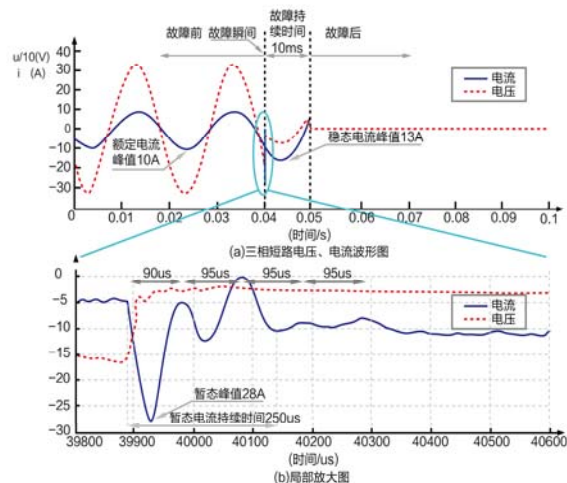


图 3 某典型光伏逆变器出口三相短路实测波形

2.4 防孤岛保护

对于分布式光伏并网发电系统，当电网侧开关因某种原因开断时，发电系统可能继续工作并与周围的负载形成一个独立供电的孤岛。孤岛的发生对检修人员和用电设备带来潜在的危害，因此需要配置防孤岛保护。汇总多地的调研结果来看，分布式光伏并网逆变器虽然通过了实验室单体防孤岛功能检测，但在现场运行特别是多台并联时仍然存在防孤岛检测盲区。

光伏电站的防孤岛保护有主动式和被动式两种，主动防孤岛通过有意地引入扰动信号来监控系统中电压、频率以及阻抗的相应变化，以确定孤岛的存在与否；被动防孤岛通过检测逆变器交流输出端电压或频率的异常来检测孤岛效应。

主动防孤岛保护存在与线路保护重合闸相配合的问题。GB/T 29319-2012《光伏发电系统接入配电网技术规定》要求防孤岛保护功能动作时间应不大于 2 秒。通常，配网中线路保护重合闸的时间一般要求不小于 1 秒，为防止线路重合对系统和孤岛运行的设备造成冲击，应保证主动防孤岛保护在重合闸之前动作。整定时一方面可以延长重合闸时间，另一方面也可以缩短主动防孤岛动作时间，实现保护配合，如图 4。当然，接有分布式光伏的线路保护也可停用重合闸。

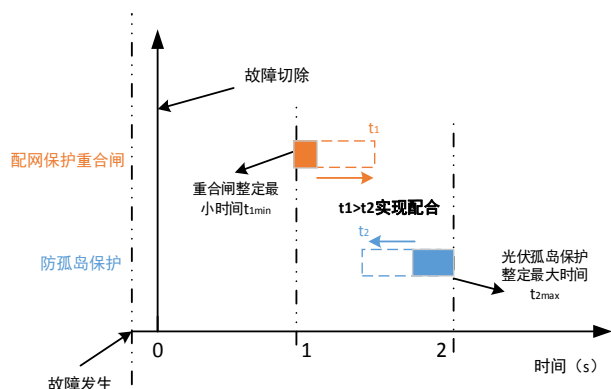


图4 防孤岛保护与重合闸动作时间配合示意图

为了满足 GB/T 29319-2012、GB/T 19964-2012，企标 Q/GDW 617-2011 和国网 2013 年 333 号文等技术标准的要求，10kV 电压等级并网的光伏逆变器在设计时需要兼顾低电压穿越和防孤岛保护功能，通常会预置多条保护动作曲线。如果同时具备低电压穿越和防孤岛保护，被动防孤岛和低电压穿越的保护范围将会存在不匹配区域（图 5），需要人工调整被动防孤岛保护的動作时间，实现与低电压穿越的配合。

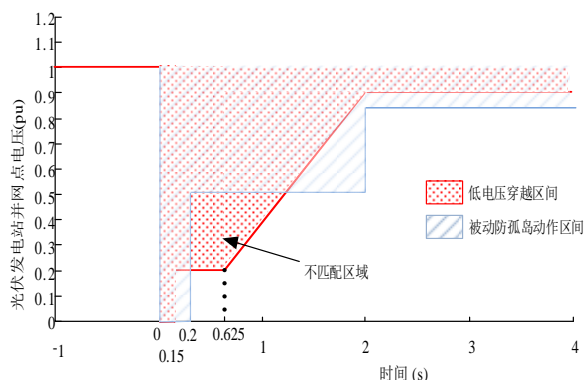


图5 防孤岛保护与低电压穿越匹配示意图

此外，对于主变低压侧接有分布式电源的配网，供电线路故障跳闸后可能形成孤岛，引起主变零序过压保护动作。图 6 所示供电系统，用户变 110kV 供电线路 1 发生单相永久性接地故障，线路保护三跳线路 1 系统侧 735 开关。735 开关跳闸后，用户变的 110kV 系统为中性点不接地系统，且故障点依然存在，由于用户变#1 主变 10kV 系统有并网分布式电源，若形成孤岛运行，会导致#1 主变中性点零序过压保护动作跳主变各侧开关。

主变中性点零序保护一般整定延时 0.5s 动作。若分布式电源防孤岛保护可在 0.5s 内动作切除并网电源，可以防止主变跳闸，需校核孤岛保护的動作时限，并与主变零序保护配合。对于这种情形，如果孤岛保护时间无法与主变零序保护配合，也可考

虑采用以下两种措施，避免主变中性点零序保护动作跳主变：1) 在主变中性点零序保护中增加一短时限（0.3s），在主变中性点保护动作后，先跳开用户变 10kV 母线上分布式电源并网线路开关 111；2) 电源侧线路开关 735 跳开时，远跳分布式电源并网开关或并网线路开关 111。

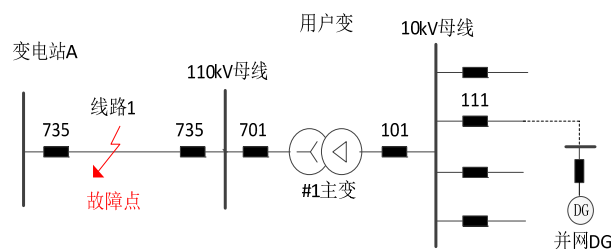


图6 110kV 线路故障引起主变零序保护动作案例示意

2.5 并网接口技术

为实现光伏发电的安全并网，一方面存在完善多种保护配置需要，另一方面运行时还需实现通信、数据采集和控制等功能，给光伏并网装置提出了较高要求。

作为一种并网整体解决方案，还可采用并网接口设备实现分布式光伏的安全接入。分布式光伏发电并网接口设备能实现并网点开关和分布式光伏发电系统的控制，具备分布式光伏发电数据采集、保护、监控、通信和对时等综合功能，提高光伏发电系统运行可靠性。

目前江苏电网为规范分布式光伏接入，已在南京等地开展了分布式光伏并网接口设备的试用，能满足分布式光伏并网的计量、保护、测控等功能需求。

3 运行与检修问题及对策

运行检修方面，分布式光伏面临的问题主要集中在自动化监控、功率预测和反孤岛保护等。

3.1 自动化监控

目前，分布式光伏大多没有纳入电网调度监控范围，随着规模的进一步扩大，分布式光伏将会对配电网的运行、检修等产生显著影响。

针对 10kV 接入的分布式并网光伏，调控中心应实施监控，上传信息包括并网设备状态、并网点电压、电流、有功功率、无功功率和发电量；针对 380（220）V 接入的分布式光伏，目前仅需通过用电信息采集系统向营销部门上传发电量信息。

目前，380(220)V 的空气开关，自身不具备检

有压自动合闸的功能。当电网故障停电、计划停电后恢复送电，分布式光伏的并网点空气开关无法自动合闸，造成光伏并网发电量损失，解决措施如图 7 所示，采用电操机构，当电网侧电压恢复到 85% 额定电压后，经 20s 到 5min 延时自动合闸。

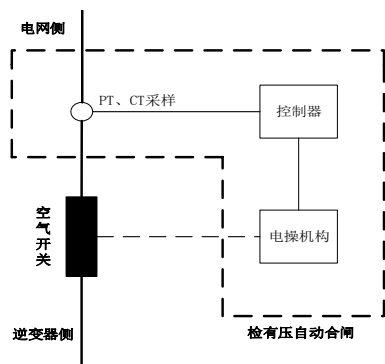


图 7 380/220V 检有压自动合闸原理示意图

3.2 功率预测

大规模、高渗透率的分布式光伏接入配电网后，可考虑建设光伏发电功率预测系统，基于实时气象信息，生成区域内分布式光伏出力的预测曲线，为发电计划的制订、备用容量的确定、检修计划安排、在线技术监督等提供参考。

3.3 反孤岛技术及装置

由于部分分布式光伏并网装置防孤岛性能不可靠，系统故障或检修时，光伏发电与负荷就地平衡，形成孤岛。当电力检修人员在维护接有分布式光伏发电系统网侧线路或设备时，造成安全隐患。

反孤岛技术基于光伏发电的孤岛运行机理和防孤岛保护策略，通过改变分布式光伏发电岛系统的功率平衡，破坏分布式光伏发电孤岛运行条件，实现反孤岛功能。

反孤岛装置，主要由操作开关和扰动负载组成。一般安装在分布式光伏发电系统送出线路电网侧，在电力人员检修与分布式光伏发电相关的线路或设备时使用。图 8 是反孤岛装置原理示意图。

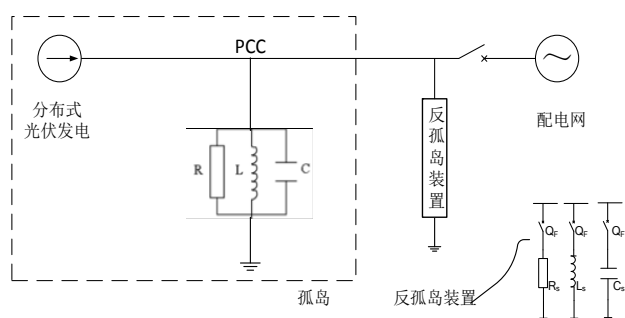


图 8 反孤岛装置原理示意图

投入阻性反孤岛装置，引起分布式光伏发电系统过欠压保护动作，破坏其孤岛运行。

投入感性或容性反孤岛装置，引起分布式光伏发电系统过欠频保护动作，破坏其孤岛运行。

4 计量安全问题及对策

为促进分布式光伏的发展，国家发改委明确了分布式光伏上网电价补贴标准为 0.42 元/千瓦时。由于分布式光伏所发电量能够全额享受高额补贴，此补贴主要依据光伏发电计量表计，因此存在用户通过技术手段多计量光伏上网电量获取高额补贴的风险，国内已有多个省份发现该问题。可能的窃电方法有：

(1) 市电整流逆变法。市电整流逆变法（图 9）是直接利用整流装置将市电整流成直流，并联于光伏发电系统的直流侧，经过光伏逆变器转化成交流电上网。

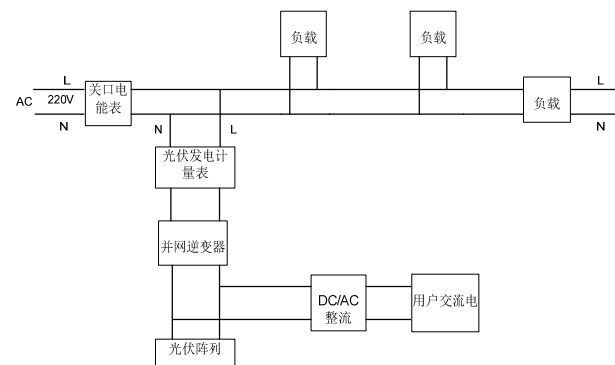


图 9 市电整流逆变法示意图

(2) 市电改接法。市电改接法（图 10）是将光伏计量表的进线改接为市电的进线，此时光伏电表的计量数据为家电设备的耗电量。

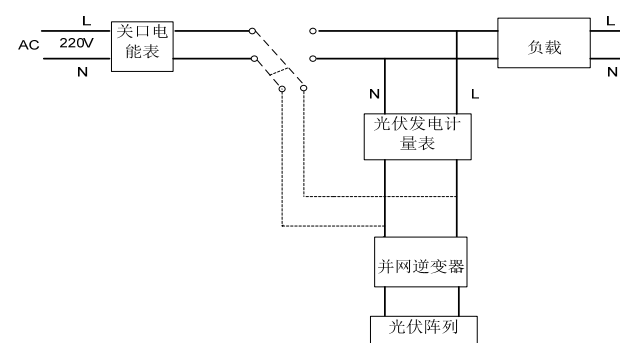


图 10 市电改接法示意图

(3) 光伏计量表升压法。光伏计量表升压法（图 11）是利用附加的升压变压器构造一个虚高的电压接入到光伏计量表，使电表转速加快，多计光伏发电量以骗取国家电价补贴。该方式在实施时需拆光伏电表铅封。

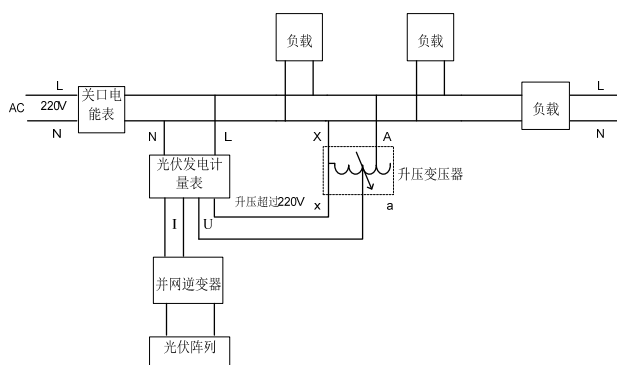


图 11 光伏计量表升压法示意图

(4) 光伏计量表升流法。光伏计量表升流法(图 12)是利用附加变压器在光伏计量表的电流回路上附加一个虚电流,使电表转速加快,多计发电量以骗取国家电价补贴。

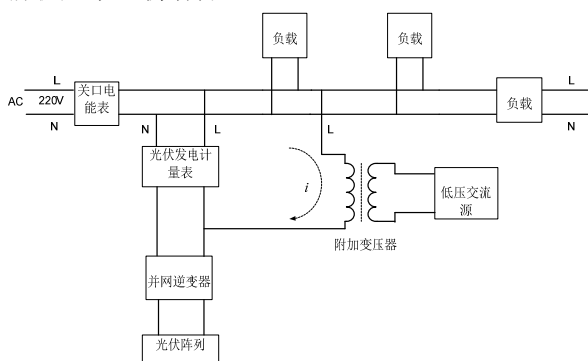


图 12 光伏计量表升流法示意图

为实现分布式光伏的安全计量,主要可以通过技术和管理两个方面来实现。

管理方面,借助智能电表对光伏实时数据甄别,通过对分布式光伏发电数据的纵向和横向比较、当前数据与历史数据的比较、每日内不同时段的比较,若发现有不正常的现象,例如非日照时段光伏出现不正常出力、相似日常条件下光伏出力明显不同等,可以对这类光伏进行重点稽查,对存在问题的用户进行惩罚。

技术方面,由于发电量与辐照等气象因素直接存在强关联关系,可以针对 MW 级分布式光伏,建立光伏发电功率监测系统,通过监测气象信息,推算光伏电站应发电量,当计量上网电量出现明显异常时,加强监管和稽查。

技术监督方面,加强对分布式光伏发电的现场检查,定期对光伏上网的计量表计等进行检查,确保光伏上网电量的准确计量。

5 标准规范的不一致及统一

近几年,中电联、国家电网公司等相关机构颁

布了多项光伏发电接入电网的国家、行业和企业技术标准和规范,涉及接入电网技术要求的有国标 GB/T 29319-2012、GB/T 19964-2012,企标 Q/GDW 617-2011 和国网 2013 年 333 号文等,目前已颁布的行标主要涉及光伏并网检测相关内容。在接入电网技术规定中,不同标准之间存在一定的不一致,影响标准实际功能的发挥。

在光伏发电的分类方面,各标准之间存在不一致现象。国家标准 GB/T 29319-2012 《光伏发电系统接入配电网技术规定》和 GB/T 19964-2012 《光伏电站接入电力系统技术规定》分别将光伏发电分为光伏发电系统和光伏电站,并分别出台对应的并网技术规定;而国网 2013 年 333 号文《关于印发分布式电源并网相关意见和规范的通知》将光伏发电分为分布式光伏和集中式光伏。光伏发电在不同标准中分属不同种类,技术要求存在较大差异,产生一定矛盾。

低电压穿越方面,国标 GB/T 19964-2012 《光伏电站接入电力系统技术规定》中明确提出了持续时间为 0.15 秒的零电压穿越,而国网公司标准 Q/GDW 617-2011 《光伏电站接入电网技术规定》中是持续时间为 1 秒的 20% 额定电压穿越,两者存在显著差别,且国标的要求高于国网公司所提要求。

因此,不同标准的出台需要对原有的接入标准中不一致的地方进行说明,并明确以某一个标准中的规定为准,确保标准的可执行性;同时,还应对不同标准的适用条件进行规范,避免不同标准适用范围的交叉,在实际操作中产生矛盾。

6 结论

本文针对分布式电源接入规划设计、安全接入技术,运行与检修以及计量安全等方面存在的技术和管理问题进行了详细分析,并有针对性地提出了规划有机衔接、完善新能源接入典型设计、简化配套工程建设流程、优化保护配置、建设功率预测系统、推广反孤岛技术和并网接口技术、建立分布式光伏发电窃电监管系统、规范统一标准体系等技术和措施,对大规模分布式光伏安全、高效和友好地接入配电网提供了参考。

参考文献:

- [1] 王成山,李鹏. 分布式发电,微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2):10-14.

- [2] IEEE 1547 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. 2003.
- [3] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18):10-16.
- [4] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34):1-8.
- [5] 余贻鑫. 智能电网的技术组成和实现顺序[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2):1-5.
- [6] 杨明, 韩学山, 王士柏, 等. 不确定运行条件下电力系统鲁棒调度的基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(supplement):100-107.
- [7] 陆晓楠, 孙 凯, Josep Guerrero, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 2013, 28(4): 35-42.
- [8] 徐敏, 阮新波, 刘福鑫, 等. 氢光联合供电系统的能量管理[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10):166-175.

作者简介:

李 群 (1967-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行分析和新能源。