

光伏并网发电系统对电网的影响研究综述

陈 炜¹, 艾 欣¹, 吴 涛², 刘 辉²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 对光伏并网发电系统的2种重要形式(分布式光伏并网发电系统与大规模集中式光伏并网发电系统)的原理与特点进行了详尽的阐述,分析并总结出这2种光伏并网发电系统接入电网后会对电网主要产生如下几方面的问题:关于谐波、电压与频率的电能质量问题;孤岛效应问题;可靠性与稳定性问题;电网效益问题;配电网的负荷特性、规划与调度、配电网自动化、配电网电压、配电网保护等问题。在此基础上对光伏并网发电系统接入电网后所产生的每类问题的原因及国内外研究现状与主要解决措施进行了综述。

关键词: 光伏; 并网; 孤岛效应; 逆变器; 安全; 稳定; 可再生能源

中图分类号: TM 615

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.005

0 引言

随着世界经济的飞速发展,人类对能源需求的日益增加,以及传统能源的日益枯竭,人们开始将目光投向了清洁可再生的新能源,希望其能改变现在的能源结构,进而实现可持续发展。太阳能作为一种清洁可再生的能源,以取之不尽、用之不竭、廉价、无污染的特点使其有着其他新能源无法比拟的优势。

近年来,光伏发电发展迅猛,光伏组件的成本日益降低,2004年在欧洲范围内光伏组件(光伏并网系统)成本为5 €/W_p,预计到2020年将小于1 €/W_p,2030年将小于0.5 €/W_p^[1]。截至2007年底,世界太阳能电池累计装机容量已达到12300 MW。2008年全世界太阳能电池总产量达6850 MW,我国太阳能电池总产量达1780 MW;到2008年底我国光伏系统的累计装机容量达到140 MW^[2]。2008年全世界新增光伏发电装机容量中约有1 GW来自10 MW及以上容量的光伏电站,我国也计划于甘肃敦煌、昆明石林、青海柴达木盆地等地建设兆瓦级光伏电站。随着各国百兆瓦级甚至千兆瓦级光伏电站的建设,光伏电站的大型化和并网化将成为今后发展以及研究的主要方向^[3]。

在众多光伏发电待研究的问题中,光伏发电系统并网对系统的影响问题是一个迫切需要解决的问题。本文通过介绍光伏并网发电的原理与特点,对光伏发电系统并网后对电网的多个方面的影响进行了一定的阐述。

1 光伏并网发电系统的类型、原理与特点

1.1 光伏并网发电系统分类

光伏并网发电系统按照其发电方式一般可分为:集中式光伏并网发电系统与分布式光伏并网发

电系统^[4]。

集中式光伏并网发电系统,即光伏并网电站系统,系统所发电力直接进入电网,但这种方式不能完全发挥太阳能分布广泛、地域广阔等特点。

分布式光伏并网发电系统,即户用型光伏并网系统,它可与建筑物结合形成屋顶光伏系统,通过设计可以降低建筑造价和光伏发电系统的造价。在分布式光伏并网系统中,白天不用的电量可以通过逆变器出售给当地的公用电力网,夜晚需要用电时,再从电力网中购回^[5]。

此外,光伏并网发电系统按照系统功能又可以分为2类:一类为不含蓄电池的“不可调度式光伏并网发电系统”;另一类为包含蓄电池组作为储能环节的“可调度式光伏并网发电系统”^[6]。

如今光伏并网发电系统有以下两方面的发展趋势:光伏并网电站容量向大型化发展,性能向并网友好型发展。

1.2 光伏并网发电系统原理与特点

光伏发电是基于半导体的光生伏打效应将太阳能辐射直接转换为电能。光伏电池阵列发出的直流电经过逆变器转化为符合要求的交流电后,直接或通过变压器接入电网。光伏系统一般由光伏电池板、控制器、储能器件、逆变器组成。图1为一个典型的光伏发电系统的结构图^[7]。图2为光伏并网电站的等值简化电路^[8],图中, I_p 为光电流; i_{pv} 为光伏阵列输出电流; C_{pv} 为光伏阵列出口侧滤波电容; U_{pv} 为滤波电容器直流电压; L_{ac} 为逆变器交流侧滤波电感; R_{ac} 为滤波电感等值电阻; C_{ac} 为逆变器交流侧滤波电容; i_{ac} 为逆变器交流侧输出电流; u_{ac} 为滤波电容器端电压; N 为变压器变比; L_s 为从变压器到并网节点的等值电感; R_s 为变压器到并网节点等值电阻; i_s 为光伏电站注入并网点的电流; u_s 为并网点母线电压,其幅值为 U_s ,相位角为 θ_s 。

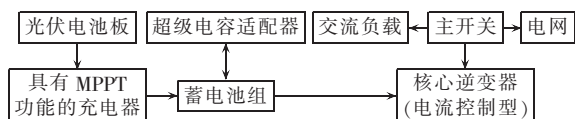


图 1 光伏发电系统结构图

Fig.1 Structure of photovoltaic power system

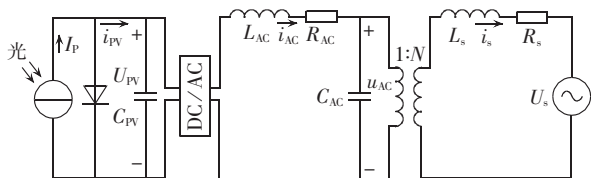


图 2 并网光伏电站的等值简化电路

Fig.2 Simplified equivalent circuit of grid-connected photovoltaic power system

光伏发电系统一般具有以下特点。

a. 随机波动性^[9-10]。作为一种典型的可再生清洁能源,环境温度、太阳能光照强度以及天气条件对光伏发电系统的影响十分强烈,由此造成了光伏发电系统最大的特点——随机波动性。图 3 为某光伏发电系统输出的有功功率曲线^[11]。可以看出随着光照等气象条件的变化,光伏发电系统输出的有功功率曲线呈随机波动的特点。

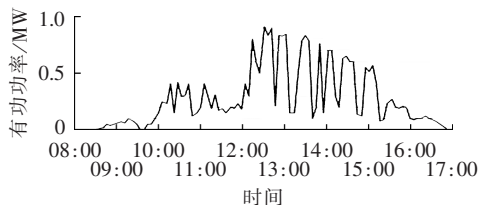


图 3 某光伏发电输出有功功率曲线

Fig.3 Output curve of photovoltaic active power

b. 现有主要的光伏并网逆变器的控制方式为电压源电流控制,即输入侧为电压源,输出为电流源控制,通过控制输出电流以跟踪并网点电压,达到并网的目的。输出近似为纯有功功率,功率因数接近于 1。此外,光伏发电系统的谐波产生也主要是由逆变器产生的^[12]。

c. 并网逆变器的抗孤岛保护功能与负荷状况的相关性。由于现有的光伏发电容量相对于负载比例小,市电消失后电压、频率会快速衰减,抗孤岛设备可以准确检测出来。但是随着光伏发电容量不断加大,光伏并网发电系统中会有多种类型的并网逆变器(不同保护原理)接入同一并网点,导致互相干扰,同时在出现发电功率与负载基本平衡的状况时,抗孤岛检测的时间会明显增加,甚至可能出现检测失败^[12-13]。

对于光伏并网发电现有的 2 种重要形式,除了具有光伏并网系统的普遍特点之外,还具有其自身的一些显著特点。

分布式光伏并网发电系统的特点如下:

a. 分布式光伏并网发电系统所发出的电能是直接分配到用户负载上的,多余或不足的电能通过与之相连接的配电网调节;

b. 分布式光伏并网发电系统一般接入电压等级为 0.4 kV 的低压配电网;

c. 分布式光伏并网发电系统还可以与其他新能源一起以微网的形式接入大电网,并与大电网互为支撑^[14],这是提高光伏并网发电系统规模的一种重要技术出路。

集中式光伏并网发电系统的特点如下。

a. 集中式光伏并网发电系统与分布式光伏并网发电系统相比,可以方便地进行无功和电压控制,同时也更容易地参与到电网频率调节中。但是,由于集中式光伏并网发电系统一般位于太阳能资源丰富与稳定的荒漠地区,需要通过长距离的高压输电线路并网,这就使其自身对于电网而言成为了一个不可忽视的干扰源,电压跌落、线路损耗、无功补偿等问题将不容忽视^[15]。

b. 集中式大规模光伏发电系统的接入电压等级一般为 10 kV,但一些更大规模的光伏发电电站会接入到更高的电压等级。

c. 二次设备的投入加大^[16],如大量光伏发电系统接入电网后,需加装或更换保护及自动化装置。光伏发电系统引起的非正常孤岛问题,需加装有效的反孤岛保护^[11]。光伏电源所引起的逆潮流现象需要新的电压控制策略^[9]。

针对这些特点,现在国内外集中式大规模光伏发电系统有以下发展趋势:

a. 容量越来越大,向百兆瓦级甚至千兆瓦级转变;

b. 光伏并网逆变器大型化,采用上百千瓦到兆瓦级甚至更大容量的光伏并网逆变器;

c. 接入电网电压等级越来越高;

d. 电网适应性要求提高,提出了光伏电站具备有功/无功控制能力、低电压穿越能力以及能够参与电网调度等技术要求。

近年来我国在大规模新能源并网发展方面加大了投入,国家财政部、科技部和国家电网公司于 2009 年 4 月 13 日召开了“金太阳工程”协调会,总投资约 150 亿元的国家风光储示范项目正式启动,开发规模为 500 MW 风力发电、100 MW 光伏发电、110 MW 化学储能。同年 6 月 12 日,国家风光储项目落户张北县,此项目是目前世界上规模最大,集风电、光伏发电、储能及输电工程四位一体的可再生能源项目。

2 光伏发电并网对电网的影响

由于光伏发电与传统的火力发电、水利发电在

固有特性与接纳方式等方面有很大的不同,所以在并网时通常会产生以下几方面的问题。

2.1 电能质量问题

由于光伏并网发电系统只能提供有功电能,则负载的无功电流可能会影响电网末梢的供电质量,需增加相应的无功补偿设备。另外,光伏发电系统受昼夜太阳辐射变化的影响很大,具有间歇性、不稳定性等特点,从而其发电功率也将出现间歇性和不稳定性。为了提高并网装置的利用率,改善光伏并网系统的电能质量,使其具有良好的经济效益,文献[17]提出了基于瞬时无功理论的 i_p-i_q 电流检测方法的光伏并网逆变器的 2 种控制方案,实现了逆变器并网发电、动态无功补偿、有源滤波的柔性结合,同时又改善了电能质量;文献[18]针对统一电能质量调节器因直流侧没有储能设备通常不能对负载进行电力中断补偿,且太阳光的日夜交替变化导致光伏并网发电装置只能间歇工作,从而影响设备的利用效率和电力系统正常运行的不足,提出了一种新的统一电能质量调节器结构和控制策略,该系统可以同时实现电能质量综合治理、光伏并网发电以及电力中断补偿。

以下针对谐波、电压、频率来具体阐述光伏并网发电系统接入后主网的电能质量问题。

2.1.1 谐波

随着光伏发电系统在电网中所占的比例越来越大,谐波污染问题会成为其发展中一个不可忽视的问题。

光伏逆变器中含有大量的电力电子元件,在直流逆变为交流时不可避免地会产生谐波,对电网会造成谐波污染^[19],并且在并网逆变器输出轻载时谐波明显变大^[20],在额定出力的 20% 以下时,电流谐波总畸变率(THD)会超过 5%^[12]。如果电网中含有多个谐波源,还有可能会产生高次谐波的功率谐振。因而在保证逆变器自身可靠性的同时,还需降低线路电流谐波总含量。主要通过以下两方面来加以控制:一是在逆变器中采用谐波抑制电路和有源功率因数校正电路对高次谐波加以处理;二是在供电设备端对流入的高次谐波和畸变电流加以处理^[21]。因此,对光伏系统中的谐波进行准确且快速的测量分析是很有必要的。现有的并网逆变器抑制谐波的方法主要有群控技术方法与综合补偿控制方法 2 种。文献[22]应用加窗插值基 2FFT 算法,有效地实现了对谐波各项参数的检测分析,并应用此方法对光伏并网模型的谐波进行了检测分析。

此外,国家针对谐波会造成的危害也设定了一系列标准,如国家电网公司光伏太阳能电厂接入系统技术规范与分布式电源并网技术规范,所连公共连接点

的谐波电流分量(方均根值)应满足 GB/T14549—1993《电能质量 公用电网谐波》的规定^[23]。

2.1.2 电压和频率

光伏并网发电系统的 2 种形式会对配电网和高压输电网的电压质量与频率质量及其控制造成一定的影响。

分布式光伏并网发电系统一般处于用户附近,为当地负荷服务,可通过并网来实现功率的补偿与外送,从而减少对电网的依赖,也减少了电力传输所造成的线路损耗^[24];同时也可以与风电、燃气机等新能源组成智能微网在一定条件下脱网独立运行^[25]。但配电网中的潮流方向会随时变化,这就使得相关的保护定值需要重新整定;馈线的电压调节设备的正常工作也会受到影响,从而增加了系统的复杂性。在发生潮流倒送时,光伏发电系统与变电站之间的电压降会梯度地变化,通过调节变压器的调压开关可以予以修正,还需与光伏发电系统和无功补偿装置配合使用^[26]。

集中式光伏并网发电系统一般选址于偏远的荒漠地区,需要通过升压变压器以中压或者高压接入电网。按照国家电网公司的相关规定:大于 8 MW 的分布式电源应予以调度。因此,大规模光伏电站和普通电厂一样也应设有相应的二次设备^[27]。由于光伏的功率因数接近 1,所以大规模集中式光伏发电系统应配备一定比例的无功补偿设备,使其具备一定的无功调节能力,保证电站功率因数和高压侧母线电压保持在一定范围内^[28]。

随着光伏发电系统在电网中比例逐步加大,其发电有一定的随机性,会使系统的频率时常波动,这就需要系统中具备足够量的调峰电源以及增加调频能力快的机组的比例,如汽轮机、抽水蓄能电站等。

2.2 孤岛效应问题

光伏并网发电系统的孤岛效应是指与光伏发电系统连接的电网线路因故障、事故或停电检修与其跳脱时,光伏并网发电系统继续向所带负载供电,从而形成了一个供电公司无法掌握的自给供电孤岛^[29-30]。

孤岛效应会对配电网系统和用户端造成严重的危害,主要体现在以下几个方面^[31-32]:

a. 对电网负载或人身安全的危害,当配电网故障时,用户或线路维修人员可能意识不到自给供电系统的存在,从而造成安全事故;

b. 缺少了电网的支持,电力孤岛区域的供电电压和频率不稳定,容易造成用电设备的损坏;

c. 电网恢复供电时,光伏发电系统重新并网会因相位不同步引起大的电流冲击;

d. 切换成孤岛运行的光伏发电系统,如果无储能元件或储能容量太小,用户负荷会发生电压闪变。

因此研究孤岛效应的检测方法和保护措施,将孤岛效应的危害降至最低,具有很重要的意义。

孤岛检测方法主要分为:主动式与被动式^[33-34]。主动式检测方法是指通过控制并网逆变器,使其对电网施加一些扰动信号。当电网正常运行时,由于电网的平衡作用,所施加的扰动信号无法检测,但当电网出现故障时,并网逆变器施加的这些扰动信号将快速地累积并超过并网标准所允许的范围,从而触发孤岛效应的保护电路。被动式检测方法是指通过检测并网逆变器的输出是否偏离并网标准规定的范围(如频率、电压或相位),判断孤岛效应是否发生。

主动检测法主要有有源频率偏移 AFD (Active Frequency Drift)法、带正反馈的有源频率偏移 AFDPF (Active Frequency Drift with Positive Feedback)^[35-36]、滑模频率偏移 SMS (Slip Mode frequency Shift)输出功率扰动检测等。主动检测法的原理是引入一些功率扰动量,而这些扰动量会使系统输出电能质量下降。被动检测法主要有过/欠电压、高/低频检测、相位突变检测、电压谐波检测等。被动式检测方法具有原理简单、容易实现、对电力系统无谐波影响等优点。但是,由于光伏电源的功率与局部电网负载的功率在基本平衡的状态下而导致并网逆变器的输出电压和频率变化很小,所以采用被动式孤岛检测方法时,会出现较大的检测盲区。在考虑采用被动式检测方法的时候,应该避免这种状况出现^[37-38]。

针对孤岛检测中采用的各种方法,文献[38]提出一种新型的过/欠电压与功率扰动法,其具体方法是通过检测逆变器与电网连接点的电压幅值与频率来判断孤岛效应是否发生。同时,为防止在孤岛检测中由于负载盲区而产生的误判现象,在试验中采取主动式孤岛检测方法,即引入功率扰动减小误判现象的发生。文献[39]提出了一种在 AFD 偏移基础上改进的 2N 周期扰动法与关键电量检测法相结合的方法,该方法可以有效减小非检测区并且在检测区内可以提高孤岛检测的可靠性。文献[40]针对目前光伏逆变器的反孤岛研究主要集中于对单台逆变器的检测算法与参数优化,采用孤岛检测相位原理和负载品质因数与谐振频率坐标系下的盲区空间理论,深入分析了 AFD 及 AFDPF 在多级并网工作模式之间的相互影响及孤岛检测盲区的变化规律,揭示了多机并网下孤岛检测可靠性与工作条件的关系。

2.3 可靠性与稳定性问题

光伏并网发电系统接入主网后会对系统的供电可靠性和稳定性造成以下几方面的影响:

a. 如前所述,光伏发电系统发电量的波动性和随机性会引起输出功率不稳定,进而会对系统的供电可靠性造成一定程度的影响;

b. 光伏电站的选址、配置容量和与电网的连接方式,以及故障光伏电池组件的切除也会对系统的可靠性造成影响^[22,41];

c. 随着光伏发电系统大量投入运行,所占的发电容量比例越来越高时可能会引起系统的动态稳定性问题。

针对光伏发电系统接入主网后所引起的可靠性与稳定性的问题,国内外已进行了一定的研究。光伏发电具有随机性强的特点,需要建立光伏电站发电可靠性模型,进行可靠性评估。文献[42-43]提出了几种适用的可靠性计算模型。随着光伏并网发电系统在电网内的渗透率越来越高,分析其对系统稳定性的影响问题就显得越来越重要,对此文献[44]利用 PSS/E 分析了光伏并网发电系统接入系统后所带来的稳定性问题。文献[45]就光伏并网发电系统在电网中的“渗透率”进行了描述,并针对“高渗透率”对电网所带来的潜在影响问题进行了综述。文献[46]分析了大范围的光伏发电系统并入电网对系统振荡稳定性的影响,并指出光伏发电系统分散性地渗透入电网比集中在某处并入电网更有利于系统的振荡稳定。此外,文献[47]提出以故障组件对光伏电站的整体出力影响为判据的故障光伏组件切除条件,但并未考虑光伏电池组件的耐受电压以及故障组件位置分布的影响。文献[41]提出针对光伏电站发出的无功功率与接入点电压关系以及光伏电站的故障特性,对光伏电站的无功功率与电网潮流进行求解,从而提出光伏电池组件的切除条件。

针对光伏发电系统大量投入运行时可能引起的稳定性问题,文献[48]对利用电池储能、转移负荷、在最大功率输出点以下运行这 3 种减少由集中式光伏并网发电系统所引起的功率波动问题的方法进行了比较研究。此外,还可以通过柔性交流输电技术、高压直流输电以及能源存储技术等控制大功率源的波动,进而确保系统的稳定性和电能质量。其中能源存储装置技术主要有抽水蓄能、压缩空气储能、储能电池 3 种方式。其中储能电池的方式运用最多。为了使光伏发电连续、均衡送电,储能电池的容量与太阳能、风电机发电功率通常以大于 1 配备,即发电功率为 1 kW 时,储能电池的容量需大于 1 kW·h^[49]。但是大规模的光伏电站受投资限制,一般不设蓄电设施,造成了其传输功率大小和方向昼夜变化较大,可以通过选择有载调压变压器的方式解决^[50]。

2.4 电网效益问题

光伏发电系统接入电网后,由于其发电形式的特殊性,会给电网效益带来以下几方面的问题。

a. 由于光伏并网发电系统不具备调峰和调频能力,这将对电网的早高峰负荷和晚高峰负荷造成冲

击。光伏并网发电系统增加的发电能力并不能减少传统旋转机组的拥有量或冗余,电网必须为光伏发电系统准备相应的旋转备用机组来解决早高峰和晚高峰的调峰问题。光伏并网发电系统向电网供电是以机组利用小时数下降为代价的,这是发电商所不愿意看到的^[51]。

b. 给负荷预测造成一定的困难。负荷预测是电网规划的一个重要依据,新能源出力的随机性使电网的规划方式发生变化^[13]。良好的电网规划会使电网效益有很大的提升。近年来,新兴的电网规划方式在负荷能耗增长分析后直接引入了新能源,运用净负荷的定义归纳出电网特征,再进行常规机组的规划,并通过不断迭代从而达到更好的机组协同效果。迭代过程包括选址优化、机组协同策略、引入储能、负荷管理甚至减少某些新能源机组等,进而达到可靠性供电和尽量小的并网代价和开销的目的^[52-53]。

2.5 配电网问题

大规模光伏发电系统接入系统后,将不可避免地对配电网中的潮流方向、调度运行、保护等造成影响^[9,11,26,54-55]。

a. 对配电网负荷特性的影响:发电功率随日照强度变化,一般在 10:00 到 14:00 达到峰值,从而改变配电网的负荷曲线特征及最大负荷点。

b. 对配电网规划及调度的影响主要体现在以下几方面的改变:光伏发电系统接入对配电网潮流的改变,光伏发电系统向配电网反送功率的预测及负荷特性的改变,现有配电网的规划,调度运行方式的改变。

c. 对调度自动化的影响:现有光伏发电系统单元不具有调度自动化功能,不能参与电网频率、电压的调整,这无疑会减少配电网的可调度发电容量,从而加大配电网控制与调度运行的难度。

d. 对电压的影响:若大量光伏发电接入配电网终端或馈线末端,由于存在潮流反馈,电流通过馈线阻抗产生的压降将使负荷电压比变电站侧高,可能使负荷侧电压越限。另外,光伏发电系统输出电流的变化也会引起电压波动,而同一区域的光伏发电功率受光照变化的影响具有一致性,这将加剧电压的波动,可能引起电压/无功调节装置的频繁动作。

e. 对保护的影响。集中式光伏并网发电系统一般通过 10 kV 馈线接入配电网,当故障发生时,其故障电流的大小和分布明显与不接光伏电源时不同。同时配电网会成为一个多电源系统,这就要求继电保护设备具有方向性,从而需要重新考虑继电保护设备的设计和应用思路^[8]。

当光伏电源容量与配电网系统容量相比足够大时,将会影响配电网原有继电保护装置的正常运行。由于光伏电源对故障电流的助增或者分流作用,

流过保护装置的故障电流可能增大也可能减小,它将改变保护的范围和灵敏度,给各个保护装置的相互配合带来问题^[56]。文献[57]提出利用电抗器高阻抗值的特性,来限制分布式电源提供的短路电流,有效地解决了分布式电源与保护之间的协调性问题。文献[58]提出采用故障限流器来解决分布式电源助增电流对保护选择性的影响。文献[59]提出将配电网中的分布式发电系统分成不同的功率带,采用自适应方法进行保护配合。

3 结语

光伏发电作为新能源的一种重要形式有着很好的发展前景。但光伏并网发电会引起电网系统的电能质量、稳定性与可靠性、电网效益等问题,以及光伏系统所带来的孤岛效应问题和对配电网影响的问题,这些主要是由光伏发电的随机出力特性造成的。针对光伏并网发电系统的 2 种重要形式(分布式光伏并网发电系统与集中式光伏并网发电系统),在并入电网后所产生的上述问题中所体现出的不同,本文进行了一定的阐述。在今后的研究中针对这些不同还需进行更进一步的分析,提出更有效的解决方法,从而使光伏发电更加安全、稳定、高效率。

参考文献:

- [1] NOWAK S, AULICH H, BAL J L, et al. The European photovoltaic technology platform[C]//Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Hawaii, USA: IEEE, 2006: 2485-2489.
- [2] 姜谦. 我国太阳能光伏产业现状分析及前景预测[EB/OL]. (2009-08-10). <http://www.ocn.com.cn/market/200908/taiyang-neng101136.html>.
- [3] 赵争鸣, 刘建政. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 5.
- [4] 王长贵. 光伏并网发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14-17. WANG Changgui. The review of the grid-connected photovoltaic power system(volume one)[J]. Solar Energy, 2008(2): 14-17.
- [5] 闫士职. 基于太阳能光伏发电并网系统的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. YAN Shizhi. The research on energy photovoltaic generation and grid-connected system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [6] 王环, 武鑫. 3 kW 光伏并网逆变器的研制[C]//第八届光伏会议论文集. 深圳, 中国: [出版者不详], 2006: 6-10. WANG Huan, WU Xin. The development of 3 kW photovoltaic grid-connected inverter[C]//The 8th PV Conference Proceedings. Shenzhen, China: [s.n.], 2006: 6-10.
- [7] 陈赞. 风力发电和光伏发电并网问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. CHEN Yun. Researches on wind power and photovoltaic generation integration into power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [8] 刘伟, 彭冬, 卜广全, 等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题

- 综述[J]. 电网技术,2009,33(19):1-6.
- LIU Wei,PENG Dong,BU Guangquan,et al. A survey on system problems in smart distribution network with grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology,2009,33(19):1-6.
- [9] VARMA R K,SALAMA M,SEETHAPATHY R,et al. Large-scale photovoltaic solar power integration in transmission and distribution networks[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting 2009. Calgary,AB,Canada:IEEE,2009:1.
- [10] LI Wang,LIN Yinghao. Random fluctuations on dynamic stability of a grid-connected photovoltaic array[C]//Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting of IEEE. Columbus,USA:IEEE,2001:985-989.
- [11] 闫立伟. 微电网中光伏发电动态特性研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- YAN Liwei. Photovoltaic generation dynamic characteristics research in microgrid[D]. Chongqing:Chongqing University,2010.
- [12] 安树怀,王明渝,邓威,等. 可用于光伏并网的双频逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):84-88.
- AN Shuhuai,WANG Mingyu,DENG Wei,et al. Control strategy of dual-frequency inverter suitable for photovoltaic grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):84-88.
- [13] MCGRANAGHAN M,ORTMEYER T,CRUDLE D,et al. Renewable systems interconnection study[R]. Livermore,USA:Sandia National Laboratories,2008.
- [14] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4,31.
- WANG Chengshan,WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):1-4,31.
- [15] HILL R. Grid connected solar PV[C]//IEEE Colloquium on Developments in Photovoltaic Electricity Production. London,UK:IEEE,1997:1-3.
- [16] 温阳东,王欣. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器,2008,36(1):16-23.
- WEN Yangdong,WANG Xin. Effect of distributed generation on protection in distribution system[J]. Relay,2008,36(1):16-23.
- [17] 於锋,胡国文. 具有改善电能质量的光伏发电并网控制器研究[J]. 低压电器,2010(22):18-21.
- YU Feng,HU Guowen. Study on control strategy for photovoltaic grid-connected generation with electrical energy quality improved[J]. Low Voltage Apparatus,2010(22):18-21.
- [18] 张国荣,张铁良,丁明,等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真[J]. 中国电机工程学报,2007,27(7):82-86.
- ZHANG Guorong,ZHANG Tieliang,DING Ming,et al. Simulation research on unified power quality conditioner with PV grid connected generation[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(7):82-86.
- [19] ISHIKAWA T. Grid-connected photovoltaic power systems:survey of inverter and related protection equipments[R]. Tokyo,Japan:Report IEA-PVPS Task,2002.
- [20] 易映萍,芦开平,王林. 基于LCL滤波器的光伏并网逆变器控制策略[J]. 电力自动化设备,2011,31(12):54-58.
- YI Yingping,LU Kaiping,WANG Lin. Control strategy of LCL-filter-based inverter for photovoltaic grid connection[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(12):54-58.
- [21] 刘劲. 影响光伏并网发电谐波水平的主要因素分析[J]. 电工技术,2009(12):66-67.
- LIU Jin. Analysis of the main factor of influence grid-connected PV system harmonic level[J]. Electric Engineering,2009(12):66-67.
- [22] 马杰,张建成. 光伏并网系统的谐波检测与分析[J]. 电网与清洁能源,2010,26(11):112-115.
- MA Jie,ZHANG Jiancheng. Harmonics measurement and analysis of grid-connected PV system[J]. Power System and Clean Energy,2010,26(11):112-115.
- [23] 丁宁,孟涛. 太阳能光伏发电系统中的谐波及其治理[J]. 中国能源,2010,32(12):32.
- DING Ning,MENG Tao. Harmonic and its management of the PV system[J]. Energy of China,2010,32(12):32.
- [24] HOFF T,SHUGAR D S. The value of grid-support photovoltaic in reducing distribution system losses[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1995,10(3):569-576.
- [25] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):90-97.
- WANG Jian,LI Xingyuan,QIU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(24):90-97.
- [26] BEBIC J. Power system planning[R]. Washington DC,USA:National Renewable Energy Laboratory,2008.
- [27] 国家电网公司. Q/GDW156—2006 城市电力网规划设计导则[S]. 北京:[出版者不详],2006.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/Z 19964—2005 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京:[出版者不详],2005.
- [29] MEKHILEF S,RABIM N A. Implementation of grid-connected photovoltaic system with power factor control and islanding detection[C]//Proceedings of 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen,Germany:IEEE,2004:1409-1412.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 19939—2005 光伏系统并网技术要求[S]. 北京:[出版者不详],2006.
- [31] HUDSON R M. Implementation and testing of anti-islanding algorithms for IEEE929-2000 compliance of single phase photovoltaic inverters[C]//Photovoltaic Specialists Conference. Piscataway,NJ,USA:[s.n.],2002:1414-1419.
- [32] YU Byunggyu,JUNG Youngseok,SO Junghun,et al. A robust anti-islanding method for grid-connected photovoltaic inverter[C]//Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Waikoloa,HI,USA:IEEE,2006:2242-2245.
- [33] WOYTE A,BELMANS R,NIJS J. Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2003,18(1):157-162.
- [34] YIN Jun,CHANG Liuchen,DIDUCH C. Recent developments in islanding detection for distributed power generation[C]//2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Piscataway,NJ,USA:[s.n.],2004:124-128.
- [35] BOWER W,ROPP M. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems[R]. Albuquerque,New Mexico:IEA-PVPS,2002.
- [36] ROPP M E. Design issues for grid-connected photovoltaic systems[D]. Atlanta,GA,USA:Georgia Institute of Technology,1998.
- [37] 张化德. 太阳能光伏发电系统的研究[D]. 济南:山东大学,2007.
- ZHANG Huade. Research on grid-connected photovoltaic sys-

- tems[D]. Ji'nan:Shandong University,2007.
- [38] 冯轲,贺明智,游小杰,等. 光伏并网发电系统孤岛检测技术研究[J]. 电气自动化,2010,32(2):139-142.
- FENG Ke,HE Mingzhi,YOU Xiaojie,et al. Research on islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. Electrical Automation,2010,32(2):139-142.
- [39] 廖红伟,林永君. 光伏发电系统孤岛的检测[J]. 电力科学与工程,2010,26(11):1-4.
- LIAO Hongwei,LIN Yongjun. Islanding detection based on photovoltaic power generation system[J]. Electric Power Science and Engineering,2010,26(11):1-4.
- [40] 刘方锐,余蜜,张宇,等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(12):47-51.
- LIU Fangrui,YU Mi,ZHANG Yu,et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(12):47-51.
- [41] 张轶,鲁国起,张炎,等. 光伏电站并网对电网可靠性的影响[J]. 华东电力,2010,38(5):700-706.
- ZHANG Yi,LU Guoqi,ZHANG Yan,et al. Influence of grid connection of photovoltaic power station on power grid reliability[J]. East China Electric Power,2010,38(5):700-706.
- [42] 张芳,徐卓. 分布式发电对配电网供电可靠性的影响[J]. 江苏电机工程,2008,27(1):31-33.
- ZHANG Fang,XU Zhuo. Effect of distributed generation on the power supply reliability in distribution network[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2008,27(1):31-33.
- [43] 钱科军,袁越. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术,2008,32(11):75-78.
- QIAN Kejun,YUAN Yue. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power System Technology,2008,32(11):75-78.
- [44] AQUTHAMI T,RAVINDRA H,FARUQUE M O,et al. Study of photovoltaic integration impact on system stability using custom model of PV arrays integrated with PSS/E[C]//North American Power Symposium (NAPS). Arlington,TX,USA; [s.n.],2010:1-8.
- [45] ROPP M,NEWMILLER J,WHITAKER C,et al. Review of potential problems and utility concerns arising from high penetration levels of photovoltaics in distribution systems[C]//33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference,2008. PVSC'08. San Diego,California,USA:IEEE,2008:1-6.
- [46] SHAH R,MITHULANANTHAN N,SODE-YOME A. Impact of large-scale PV penetration on power system oscillatory stability[C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,MN,USA:IEEE,2010:1-7.
- [47] 陈闽江. 光伏发电系统的蒙特卡罗序贯仿真和可靠性分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2004.
- CHEN Minjiang. The sequential Monte-Carlo simulation and reliability in photovoltaic system[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2004.
- [48] OMRAN W,KAZERANI A,SALAMA M. Investigation of methods for reduction of power fluctuations generated from large grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26(1):318-327.
- [49] 赵波,张雪松,洪博文. 大量分布式光伏电源接入智能配电网后的能量渗透率研究[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):95-100.
- ZHAO Bo,ZHANG Xuesong,HONG Bowen. Energy penetration of large-scale distributed photovoltaic sources integrated into smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(8):95-100.
- [50] 郑诗程,丁明,苏建徽,等. 光伏发电系统及其孤岛效应的仿真与实验研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(12):3085-3088.
- ZHENG Shicheng,DING Ming,SU Jianhui,et al. Simulation and experiment research of photovoltaic generation system and its islanding[J]. Acta Simulata Systematica Sinica,2005,17(12):3085-3088.
- [51] 李维亚. 浅谈未来光伏并网发电对电网的影响[J]. 太阳能,2008(2):67-68.
- LI Weiya. Discuss the influence of the future photovoltaic grid-connected power system to the grid[J]. Solar Energy,2008(2):67-68.
- [52] 雷一,赵争鸣. 大容量光伏发电关键技术与并网影响综述[J]. 电力电子,2010(3):16-23.
- LEI Yi,ZHAO Zhengming. Overview of large-scale PV integration key technologies and its impact[J]. Power Electronics,2010(3):16-23.
- [53] CHOWDHURY B H. Optimizing the integration of photovoltaic systems with electric utilities[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1992,7(1):72-78.
- [54] KIM T E,KIN J E. Voltage regulation coordination of distributed generation system in distribution system[C]//Proceedings of 2001 IEEE Power Engineering Society Meeting. Vancouver,Canada:IEEE,2001:480-481.
- [55] LIU E,BEBIC J. Distribution system voltage performance analysis for high-penetration photovoltaics[R]. Washington DC,USA: National Renewable Energy Laboratory,2006.
- [56] 张泽云,黄家栋,段晓波. 光伏发电系统并网时对配电网保护的影响[J]. 河北电力技术,2010,29(3):17-19.
- ZHANG Zeyun,HUANG Jiadong,DUAN Xiaobo. Influence of photovoltaic power generation system on relay protection of distribution network during grid-connecting[J]. Hebei Electric Power,2010,29(3):17-19.
- [57] 王希舟,陈鑫. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器,2006,34(3):15-19.
- WANG Xizhou,CHEN Xin. Research on the coordination of distributed generation and distribution system protection[J]. Relay,2006,34(3):15-19.
- [58] 吴罡,陆于平,花丽丹,等. 分布式发电采用故障限流器对继电保护性能的影响[J]. 江苏电机工程,2007,26(2):1-4.
- WU Gang,LU Yuping,HUA Lidan,et al. Impact of fault current limiter to the performance of relay protection in distributed generation[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2007,26(2):1-4.
- [59] BRAHMA S M,GIRGIS A A. Development of adaptive scheme for distribution system with high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):56-63.

作者简介:

陈 炜(1985-),男,陕西西安人,博士研究生,从事新能源接入与微网运行等方面的研究(E-mail:228345271@qq.com);

艾 欣(1964-),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,主要从事新能源电力系统及微网等方面的研究。

(下转第39页 continued on page 39)

北京:科学出版社,2009:189-195.

- [28] KUFFEL P,KENT K,IRWIN G. The implementation and effectiveness of linear interpolation within digital simulation[J]. Electrical Power and Energy System,1997,19(4):221-227.
- [29] IRWIN G,WOODFORD D,GOLE A. Precision simulation of PWM controllers[C]//Proceedings of the 2001 International Conference on Power System Transients. Rio de Janeiro,Brazil:[s.n.],2001:161-165.
- [30] ZOU M,MAHSEREDJIAN J,JOOS G,et al. Interpolation and reinitialization in time-domain simulation of power electronics circuits[J]. Electric Power Systems Research,2006,76(8):688-694.
- [31] 王成山,李鹏,黄碧斌,等. 一种计及多重开关的电力电子时域仿真插值算法[J]. 电工技术学报,2010,25(6):83-88.
WANG Chengshan,LI Peng,HUANG Bibin,et al. An interpolation algorithm for time-domain simulation of power electronics circuit considering multiple switching events[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(6):83-88.
- [32] LOUIE K W,WANG A,WILSON P,et al. Discussion on the

initialization of the EMTP-type programs[C]//Proceedings of the 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Saskatoon,Canada:[s.n.],2005:1962-1965.

- [33] 王守相,黄丽娟,王成山,等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备,2007,27(8):11-15.
WANG Shouxiang,HUANG Lijuan,WANG Chengshan,et al. Unbalanced three-phase power flow calculation for distributed power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(8):11-15.

作者简介:



李 鹏

李 鹏(1981-),男,天津人,讲师,博士,研究方向为电力系统电磁暂态仿真与分布式发电技术(E-mail:lip@tju.edu.cn);

王成山(1962-),男,天津人,长江学者特聘教授,主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划和配电系统自动化、分布式发电等方面的研究(E-mail:cswang@tju.edu.cn)。

Methodology of transient simulation in time domain for DG and microgrid(1): basic framework and algorithm

LI Peng¹,WANG Chengshan¹,HUANG Bibin²,GAO Fei³,DING Chengdi¹,YU Hao¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2. State Grid Energy Research Institute,Beijing 100052,China;

3. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: DG(Distributed Generation) and microgrid are featured with nonlinearity and randomness and the transient simulation of their response characteristics in time domain requires detailed modeling of the elements,for which,the framework of electromagnetic transient simulation based on nodal analysis is adopted. Different algorithms of transient simulation are introduced and compared. The modified augmented nodal analysis is applied to extend the modeling capability of electrical system,the Newton iteration is applied to obtain the solution of control system and eliminate the inner time-delay of nonlinear elements,the pseudo Newton method is applied to enhance the calculation speed of control system,and the interpolation scheme is applied in the simulation of power electronic switching. The initialization methods for the transient simulation are discussed.

Key words: distributed power generation; microgrid; transient simulation; nodal equation; interpolation; time domain

(上接第 32 页 continued from page 32)

Influence of grid-connected photovoltaic system on power network

CHEN Wei¹,AI Xin¹,WU Tao²,LIU Hui²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China;

2. North China Electric Power Research Institute,Beijing 100045,China)

Abstract: The principle and features of distributed and large-scale centralized grid-connected photovoltaic power systems are described in detail and the problems due to their connection with power grid are analyzed and summarized;the power quality problems on harmonic,voltage and frequency;the islanding problem;the problems on reliability and stability;the matters of grid benefit;the problems on load characteristics,planning and dispatch,distribution automation,grid voltage,grid protection,etc,based on which,the causes of each problem are reviewed,as well as the research status and main solutions at home and abroad.

Key words: photovoltaic; grid connection; islanding effect; electric inverters; security; stability; renewable energy resource