

大规模光伏发电对电力系统影响综述

丁明¹, 王伟胜², 王秀丽³, 宋云亭², 陈得治², 孙鸣¹

(1. 教育部光伏系统工程研究中心(合肥工业大学), 安徽省 合肥市 230009;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 3. 西安交通大学, 陕西省 西安市 710049)

A Review on the Effect of Large-scale PV Generation on Power Systems

DING Ming¹, WANG Weisheng², WANG Xiuli³, SONG Yunting², CHEN Dezhi², SUN Ming¹

(1. Photovoltaic Research Center of MOE (Hefei University of Technology), Hefei 230009, Anhui Province, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: Because of human concern for energy security and environmental deterioration, making full use of renewable energy has been a global consensus. Power generation with large-scale renewable energy such as solar and wind energy has become the development trend of new power systems, resulting in increasingly prominent impact on power systems. Therefore, great concerns are given from academic and engineering areas of all countries. The purpose of this paper is to review the globe status of large-scale photovoltaic (PV) power generation, explore the factors affecting the interaction between solar power generation and power system, refine academic and engineering problems, and propose ideas for future research and development. From the perspective of power system planning, simulation, dispatching and control, this paper discusses the modeling and simulation of large-scale photovoltaic power generation, impacts of large scale PV integration on dynamic and static characteristics of power system, and key technologies about large scale PV power generation delivery and consumption. Meanwhile, suggestions for further research are proposed from the authors' point of view, offering reference for readers.

KEY WORDS: photovoltaic power generation; solar energy; power system; planning; review

摘要: 人类对能源安全的担忧和环境恶化的焦虑,使得充分利用可再生能源已经成为全球共识。以太阳能、风能为代表的大规模可再生能源并网发电已经成为新型电力系统不可阻挡的发展趋势,对电力系统深层次的影响正在凸显,各国学术界和工程界均给予极大关注。该文的目的在于综述国内外大规模光伏发电研究现状,探究光伏发电与电力系统间

交互影响的因素,提炼存在的学术和工程问题,理清下一步研发思路。论文从电力系统规划、仿真、调度、控制角度,重点讨论了大规模光伏系统的建模与仿真、大规模光伏接入对系统动态和稳态特性的影响、大规模光伏外送及消纳的关键技术分析;同时,根据作者观点,分类提出了可进一步研究的重点内容,供读者参考。

关键词: 光伏发电; 太阳能; 电力系统; 规划; 综述

0 引言

人类对化石能源枯竭、能源安全和环境恶化的担忧导致对清洁、可再生能源的需求增大,许多国家已经做出大规模开发利用太阳能发电、风力发电的决策和规划,一个以新能源发电为标志的电力系统新时代正在到来。

随着光伏发电在电力系统中装机容量所占比例越来越大,它对电力系统规划、仿真、调度、控制的影响也引起人们极大关注^[1]。光伏发电呈现“规模化分散开发、低压接入、就地消纳”以及“大规模集中开发、中高压接入、高压远距离外送消纳”两种方式并存格局,对电力系统的影响无论从深度还是广度而言都将是深远巨大的,国内外工程界和学术界的研究亦是热度不减、成果频出。

本文的目的在于从多个角度,对国内外有关大规模光伏发电与电力系统交互影响的研究现状和成果进行梳理和综述,为后继开展更为深入的研究提供借鉴与参考。

1 大规模光伏系统的建模与仿真

1.1 光伏电池及阵列模型

基于单二极管模型的光伏电池等效电路,由基尔霍夫原理(KCL)可得光伏电池模型的数学表达

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2011AA05A107)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2011AA05A107).

式^[2]。对理论计算公式进行简化,利用光伏电池供应商提供的技术参数短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大功率点电流 I_m 、最大功率点电压 U_m ,得到适于工程计算的模型表达式^[3]。光伏阵列集成模型可以根据光伏电池模型和串并联关系组合得到^[4],难点问题是光伏阵列的光伏组件差异、遮挡等造成的 P-V 特性的多峰值以及光伏阵列逆变器模型的集群建模^[1]。

1.2 并网换流器及控制模型

1.2.1 换流器及内环控制模型

DC/AC 换流器主要决定了光伏发电单元的暂态并网特性。目前主流的基于电压源型(VSC)的换流器采用具有内外环结构的双环控制方式为主。外环控制主要以电压为输入,经过控制环节生成内环控制的电流参考值,决定换流器的并网策略和外特性;内环以电流为输入,以外环控制生成的电流参考值作为基准,经过控制环节和换流器装置实现电流入网^[5]。

为了简化控制器设计,一般采用前馈解耦控制策略,将 $dq0$ 坐标系下换流器机电暂态模型的 d 、 q 轴电压、电流解耦,并将此控制环节添加到内环控制中。内环控制环节的时间常数都很小(毫秒级以下),从适应仿真软件计算步长考虑,对换流器及内环控制进行简化。换流器及内环控制机电暂态模型与简化模型框图如图 1、2 所示。

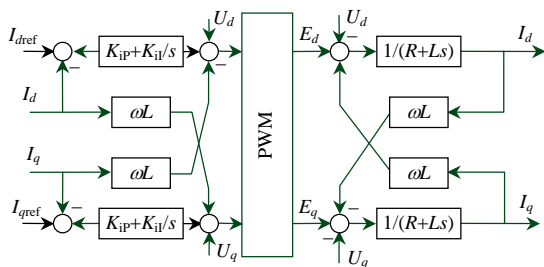


图 1 换流器及内环控制模型

Fig. 1 Inverter and inner control loop model

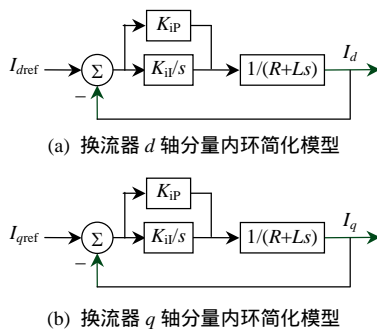
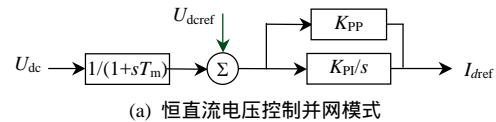


图 2 换流器及内环控制简化模型

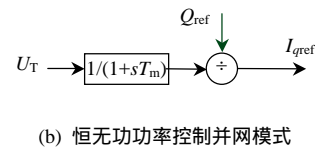
Fig. 2 Simplified model of inverter and inner control loop

1.2.2 外环控制模型

从换流器及内环控制模型可看出,光伏并网换流器具备有功、无功的解耦控制能力。外环控制根据电网对光伏发电系统的要求去设定和实现换流器的有功类、无功类并网策略,目前分为两种:电流源和电压源并网模式,如图 3、4 所示。



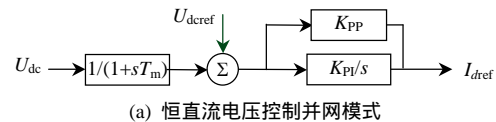
(a) 恒直流电压控制并网模式



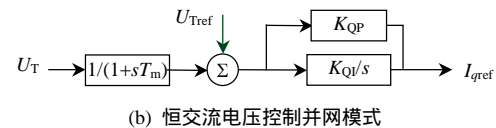
(b) 恒无功功率控制并网模式

图 3 电流源并网模式下的外环控制模型

Fig. 3 External control loop model of current source for grid-connected mode



(a) 恒直流电压控制并网模式



(b) 恒交流电压控制并网模式

图 4 电压源并网模式下的外环控制模型

Fig. 4 External control loop model of voltage source for grid-connected mode

1.2.3 其它控制保护功能的模型

在逆变器或 DC/DC 等换流装置基础上,实现优化并网性能的更多附加控制及保护功能,主要集中于 MPPT 控制、低/高电压穿越保护、孤岛保护及电能质量治理等^[6-8],需要根据实际光伏系统的控制、保护策略,研究建立相应的数学模型^[9-10],并分析其对电网稳定影响。

1.3 光伏发电系统的动态模型

采用方程组法首先建立光伏发电系统中各组成部分的状态方程,并将逆变器和 MPPT 控制环节的控制框图转换为状态方程,通过联立得到状态方程组,即建立整个光伏发电系统的模型^[11]。根据研究需要,也可选择其它建模方法^[4],如等效二端口网络模型、简化等值电路模型、受控源模型等。

1.4 光伏发电系统的稳态模型

光伏发电系统可通过电压或电流控制模式的逆变器接入电网,在潮流计算中可分别处理为有功输出、并网节点电压恒定的 PV 节点或入网电流恒定的 PI 节点,功率因数为 1 的光伏阵列并网时一般

都安装无功补偿装置,而电容器、SVC 等大多补偿装置的无功输出都与节点电压幅值有关,因此宜等效为 P-Q(V)节点^[12],如果在潮流计算时需计及光伏发电系统的内部,可建立含光伏阵列、逆变桥、变压器和滤波器等准稳态模型的潮流方程^[13]。

1.5 光伏发电系统模型的研发

基于上述建模原理,国内常用的电力系统仿真平台 PSD-BPA 以及 PSASP 中已经开发、集成了光伏电站的静态、动态模型,初步具备了大规模光伏并网分析的仿真手段^[5];在一些商业化的电力系统分析软件如 PSS/E、ETAP、PowerFactory/DIGSILENT 中,都拥有灵活的自定义模块功能,很多光伏电站建模研究都是基于这些软件开展的^[14]。

1.6 下一步研究重点及建议

1) 基于厂家提供的典型模型结构及参数等信息,通过实测及参数辨识技术,研究建立更符合实际物理特性的光伏模型,尤其是对电网动态特性影响较大的、但主要技术被封装的低/高电压穿越功能的实测及建模技术。

2) 根据 MPPT 控制、逆变器附加控制和故障穿越、孤岛保护等策略、方案的共性和差异化特征,开展精细化建模研究。

3) 综合考虑光伏阵列、换流器的组合方式、并网拓扑和控制系统,以及电站内部线路、变压器参数,研究大型光伏电站等值建模的理论、方法与模型。

4) 除了暂态建模,还应研究包含中、长期等多时间尺度的全过程仿真模型,使光伏发电系统模型能够适应多场景下的并网分析。

5) 研究大型光伏电站建模规范及验证流程,研究光伏模型的基本分类、典型结构、标准化建模方法及模型参数辨识。

2 大规模光伏接入对系统特性的影响

2.1 对有功频率特性的影响

光伏发电具有以下特性:1) 外出力的随机波动性;2) 电源是无旋转的静止元件,通过换流器并网,无转动惯量;3) 低电压穿越期间不同的有功/无功动态特性;4) 考虑电力电子等设备元件的安全,电源抗扰动和过负荷能力相对较差,易发生脱网;5) 通过逆变器并网,具备四象限控制及有功/无功解耦控制的能力。光伏系统的这些特性,使得大规模光伏接入后系统的稳态/暂态特性发生变化,进而影响到系统的运行与规划^[14-20]。

光伏电力大幅、频繁的随机波动性对系统有功平衡造成了冲击,进而影响到系统的一次、二次调频以及有功经济调度等运行特性,频率质量越限等风险加大^[21];系统备用优化策略等将因光伏接入而发生变化^[22],对与常规机组等其它多类型电源的有功频率协调控制以及调频参数整定等也提出了适应性需求;同时,由于光伏电源是非旋转的静止元件,随着接入规模的增大并替换常规电源,系统等效转动惯量降低,恶化了系统应对功率缺额和功率波动的能力,极端工况甚至会发生频率急剧变化,频率跌落速率及深度可能触发低频减载、高频切机等安控、保护动作的严重运行问题^[19]。

2.2 对无功电压特性的影响

大规模光伏集中接入更多是在戈壁、荒漠地区,当地负荷水平较低,接入的地区电网短路容量相对较小,大量光伏电力需通过高压输电网远距离外送,随机波动的有功出力穿越近区电网以及长输电通道,影响到电网无功平衡特性,进而造成沿途的母线电压大幅波动。同时,目前实际并网运行的光伏电源无功电压支撑能力较弱,发生电压质量越限甚至电压失稳的风险加大^[13-14];对于规模化光伏分散接入配电网而言,光伏接入改变了电网既有的辐射状网架结构,单电源结构变成了双电源或多电源,电网潮流分布大小、方向等复杂多变,潮流变得更加难控,进而影响到配电网的电压质量,影响程度与光伏接入位置、接入规模以及出力等关系较大^[18,23-24]。

2.3 对功角稳定性的影响

光伏电源是静止元件,本身不参与功角振荡,不存在功角稳定问题,但由于其随机波动以及无转动惯量等特性,大规模光伏接入后改变了电网原有潮流分布、通道传输功率,减小了系统的等效惯量;同时,计及故障穿越期间光伏具有与常规机组不同的动态支撑性能^[25],因此光伏接入后电网功角稳定性会发生变化,变化情况取决于电网拓扑结构、电网运行方式及所采用的光伏电源控制技术、光伏并网位置及规模。光伏接入既有可能改善、也可能恶化电网的功角稳定性^[13,15,26-27],这必须结合具体场景通过仿真分析才能确定。光伏并网还可能因故障穿越能力不足引发脱网,尤其是集中化、规模化后,脱网给系统稳定性带来的冲击将更加强烈,应结合实际并网情况,评估大规模光伏的脱网风险。我国第一个百万千瓦级青海光伏基地的集中接入改变了通道潮流分布的均匀性,且光伏电源表现出弱动

态支撑性,综合两者影响,通道的传输极限降低,通过切除光伏电源以及光伏电站配置动态无功补偿,可提升安全性。

振荡型失稳是功角失稳的一种。波动的光伏出力改变了系统运行点,同时并网逆变器与常规机组相比具有不同的控制策略,这些都会改变系统的阻尼,不但对系统原有的机电振荡模式产生影响,也会带来新频段范围的振荡^[28-29]。但一般而言,光伏接入对原振荡稳定的影响也是依接入位置、穿透率大小等情况而定^[26]。文[15]发现主动孤岛检测对系统振荡特性有负面影响;文[30]提出光伏发电系统分散性地渗透入网比集中在某处并网更有利于系统的振荡稳定。如充分利用逆变器的灵活控制功能,可提升系统阻尼。文[31]基于光伏发电系统能够独立控制其注入电网有功、无功特点,提出了利用光伏发电系统来抑制电网功率振荡的方法,设计了有功、无功的附加控制策略。

2.4 对小扰动稳定性的影响

光伏电池虽不存在机械与电磁量不平衡的动力学稳定问题,但也存在电气运行不稳定问题,进而当大规模光伏并网后也会影响到电网的稳定性^[32]。文献[33]对于特定的光伏功率注入,利用小扰动法分析了理论上存在的两个运行点中的一个是不稳定的,指出不稳定现象更多出现在接近最大功率运行点的高出力水平;文献[6]基于动态等效阻抗适配概念来剖析光伏电气运行不稳定点的机理。故障期间的不平衡功率只能由光伏电站的直流侧电容吸收,由于电容的储能作用很小,因此不平衡功率直接导致直流侧电压迅速上升,给电源可靠运行带来影响。文献[34]建立了含光伏电池、逆变器等小信号数学模型,利用特征值法分析了系统遭受小扰动后的稳定性,仿真验证了光照扰动后的稳定性。

2.5 对电能质量的影响

随着大规模光伏的接入,电力电子广泛应用使得大量非线性负载也加入到系统中,对电力系统造成污染,出现电能质量问题。逆变器开关速度延缓,导致输出失真,产生谐波;在太阳光急剧变化、输出功率过低、变化过于剧烈的情况下,产生谐波会很大;也会出现大规模光伏集中并网时电流谐波叠加的问题等。国内外若干大型光伏电站的运行经验表明:即使单台并网逆变器的输出电流谐波较小,多台并网逆变器并联后输出电流的谐波也有可能超标^[35-36]。针对这些问题,文献[37]从并网逆变器并联系统数字控制的角度出发,对多台逆变器组合

的谐波问题和稳定性进行了建模;文献[38]分析了大型光伏电站逆变器并联系统中存在的电网阻抗耦合效应,该耦合效应降低了并网逆变器控制回路的带宽和稳定裕度,导致并网电流谐波含量超标等不稳定问题;文献[39]分析了光伏电站通过长距离输电线路接入弱电网,滤波电容可能引起的谐振从而造成某些次谐波放大问题。

直流注入也是光伏并网需要解决的关键问题之一,产生原因是多方面的^[40]。光伏出力的大幅、高频随机波动也会引发电压波动、闪变以及电压偏差、频率波动等问题。针对光伏接入后的电能质量问题,提出抑制谐波的有效方法^[40]:包括增加谐波补偿器、无源固定频次滤波器、有源滤波器、混合滤波器等;提出了治理直流注入的有效解决方法,包括:1)安装隔离变压器;2)设计合理的逆变器拓扑结构;3)电容隔直;4)检测补偿;5)虚拟电容法等。

2.6 对配电系统保护的影响

光伏电源接入配电网后使配网故障特征发生了变化,对继电保护和自动装置产生若干影响:1)网架结构由单电源辐射状网络变为双电源、多电源的复杂拓扑结构,从而故障电流大小、方向及持续时间均发生变化,原有馈线保护都将受到影响,保护装置会发生误动或拒动^[41-46];2)根据变压器连接方式的不同,与变压器相连的逆变器会额外形成接地回路,影响零序电流或在单相接地故障时加大未短路相的对地电压,也将改变继电保护的動作特性^[47];3)对扰动较为敏感的并网光伏变换器增加了必要的保护内容,包括低电压穿越、输出谐波超标、输出直流分量超标和三相不平衡保护等^[47];4)当PV系统反孤岛保护功能时间不能与自动重合闸等装置协调配合时,会引起非同期合闸;5)对配电系统中的线路三相一次重合闸以及变电站(开闭所)的备用电源自投装置应用产生一定的影响。为防止出现非同期合闸,对于接有经逆变器并网的线路或母线,其三相一次重合闸起动时间或须备用电源自投断路器的动作时间均要大于逆变器反孤岛保护最大动作时间。

分布式、高密度光伏发电系统往往通过多条或一条低压配电线路接入于同一母线并网发电^[48]。由于同一区域的光伏发电功率受光照变化的影响具有相关性,高密度光伏发电系统并网,会加剧配电网局部潮流变化幅度以及电压的波动范围^[49-52]。另外,若某些与高密度光伏发电系统同一母线的供电

负荷较小的馈电线路发生短路故障时,可能导致接于馈电线路的上下级熔断器无法配合,失去选择性,甚至有可能致使流过某些负荷支路上的短路功率超过断路器的遮断容量^[53]。

2.7 下一步研究重点及建议

1) 基于大规模光伏集中接入、高压交直流外送等多种典型场景,剖析规模化的光伏与大电网动态特性的交互作用机理,从功角、频率以及电压等多个稳定侧面,分析大规模光伏接入后对大电网安全稳定的影响;

2) 研究大电网现有三道安全防线对大规模光伏接入及外送的适应性,并进行优化调整。

3) 研究规模化分散式接入的光伏与配电网交互运行机理;研究光伏大规模接入对配电网潮流分布、无功电压以及电能质量等运行特性的影响;

4) 研究光伏规模化接入后保护方案、自动装置及调度自动化系统的适应性及优化协调技术。

3 大规模光伏外送及消纳的关键技术

3.1 大规模光伏外送的输电技术

为了提高长通道外送光伏等波动性电源的可控性,在通道沿线装设可控高抗、动态无功补偿 SVC 以及可控串补等,集合多种 FACTS 装置的交流输电技术提升了系统对光伏等间歇性新能源的接纳能力。我国新疆-西北交流联网一、二通道即装设了多种类型 FACTS 装置,提升了外送大规模风光混合电力的能力。

± 800 kV 特高压直流输电技术以其远距离送电的经济性、中间无落点的直通性等优越性能在我国正逐步推广建设,为我国大规模光伏、风电等新能源的开发、外送及消纳开辟了新的通道。在此基础上,文献[54]提出了在中国北部地区利用新型直流输电技术(VSC-HVDC)建立广域可再生能源电网结构的远景设想,从而有效整合风电、光伏、水电等,以期利用广域范围内的资源互补性平衡新能源的功率间歇性和不稳定性;论述了半波长输电和分频输电的特点及发展前景,指出二者均适用于超远距离大容量电力输送。

近年来,新型直流输电技术进一步发展^[55-58],但由于 VSC 直流输电使用全控型开关器件,受开关器件容量限制,目前 VSC 直流输电在远距离、大容量输电领域还不能取代传统直流输电,其电压等级和传输容量有待进一步提高,但在大规模分散式光伏的并网和地区可再生能源消纳领域是传统

直流输电的有益补充。

3.2 光伏电站规划设计技术

光伏电站的规划设计问题涉及光伏电站的安装地点,安装容量,投资时间,光伏模块和逆变器模块的使用数量,光伏模块的安装倾角,光伏模块和逆变器的最优组合,站内连接方式,光伏电站的穿透功率、置信容量和经济评价等内容。

光伏电站的容量规划主要有独立光伏系统,混合光伏/柴油机系统,混合光伏/风电系统,混合光伏/风电/柴油机系统的容量规划^[59]等;求解这类问题的主要方法有直观类方法^[60]、人工智能优化算法^[61]等。直观类方法不考虑光伏出力的随机特性,仅根据月平均最低光照能量或平均月度太阳能用简单的公式计算。优化方法主要为基于系统可靠性分析的方法,考虑光伏与负荷的随机性,用函数表达式拟合系统可靠性与光伏电站规划容量的关系^[62],可以直接计算适合的电站规划容量,还可建立计及工程寿命周期内系统的投资成本、运营维护成本以及重置成本的经济模型并进行优化求解^[63]。

大型并网光伏电站的接线拓扑结构可以分为:集中式、组串式和微逆变器式,其中最常见的是集中式结构^[64]。光伏电站的规划设计应满足“安全、可靠、高效和经济”的原则。在规划容量确定后尚需确定光伏电站的设备选择、接线方式等具体问题。

光伏的穿透功率定义为光伏占整个发电系统总发电量(或占整个负荷电量)的百分比^[65]。过高的光伏穿透率可以引起馈线的逆向潮流及电压等问题,破坏传统变电站的开关正常工作。光伏电站的可靠性的评估有助于衡量光伏发电对电力系统充裕性和安全性的贡献,据此计算出的置信容量有效地量化了光伏发电的容量价值,成为电力系统规划中的重要指标。可靠性分析的解析法主要是根据电力系统元件的随机参数,将光伏发电等效为多状态的常规机组^[66],通过数值计算获取各项可靠性指标;模拟法主要是采用序贯蒙特卡洛法模拟,既能描述光伏发电的时序出力,又能求解频率和持续时间等可靠性指标^[67]。评估可靠性必须从组成光伏电站的各元件入手,文献[68]对光伏电池组件的故障率的变化规律进行了讨论。各种接线方式对光伏方阵可靠性影响的研究结果表明,使用 TCT 结构(total-cross-tied)和 BL 结构(bridge-linked)可以提升光伏阵列的有效工作时间。

光伏发电的置信容量反映其容量价值,用于量化光伏发电对电力系统充裕度的贡献^[69],但国内

外尚未形成明确统一的衡量标准。Perez 将现有的评估指标归纳为四类^[65]；Madaeni 等人又将常用的评估指标分为基于可靠性的评估指标和近似评估指标等^[70]。在置信容量的灵敏性分析上，研究表明光伏发电置信容量随装机容量增大而呈现出的饱和效应，光伏发电出力同负荷的相关性是影响光伏发电置信容量的重要因素^[71-72]。

光伏电站规划设计经济性指标主要有：最小能耗、净现值、生命周期成本、投资回收期等。由于净现值考虑了整个工程的使用寿命和资金的时效性，是目前的光伏电站规划设计通常采用的经济性指标^[73]。在成本/效益评价方面，文献[74]比较了光伏发电和常规发电的成本与全寿命期收益，分析了光伏发电优于常规发电的条件；文献[75]建立了多参数成本效益分析模型，通过计算发电成本、税前利润、税后现金流、净现值、内部收益率及回收期等一系列指标，说明了在塞浦路斯地区建设大规模光伏电站的可行性；研究表明贴现率和光电池效率是影响回收率的最重要因素。

3.3 提升光伏消纳的综合规划技术

大规模光伏电站的布局对电网规划也有影响。就电网规划而言，针对大规模光伏集中式并网，在光伏发电规模较小时，主要通过超高压或高压输电送入本省电网的负荷中心，需要同步加强省内超高压电网建设；随着光伏发电规模的增大，需要送入区域电网内消纳时，除了加强省内电网外，还要加强区域电网内跨省互联；随着光伏发电规模的进一步增大，还需要规划包括特高压直流在内的跨区外送通道，实现光伏发电大规模跨区外送。为提高输电通道的利用效率，需要综合考虑与区域内的水电、风电、火电等各类电源配合，实现协调运行和外送，文献[76]从宏观上分析了我国太阳能发电并网影响及各区域电网消纳能力。

针对规模化光伏分散式并网，调整配电网结构设计成为需迫切解决的问题，如何合理规划含光伏发电系统的智能配电网是必须考虑的重要因素，同时，光伏的布点及容量等也应与配电网的规划协调^[77]。随着城市光伏屋顶发电和光伏建筑一体化的增多，城市电网的规划应该留有充分余地。

科学、合理地配置电力系统中风力发电、光伏发电、常规火电、水力发电、抽水蓄能以及其它储能设备的容量、布点，并计及负荷需求侧管理等，发挥大规模光伏接入后网-源-荷的综合效益，是现阶段推进光伏开发建设必不可少的环节^[78]。

3.4 提升光伏消纳的源网协调技术

随着光伏渗透率逐渐增大，光伏逆变器的动态性能对于电网的安全变得愈加重要。针对并网逆变器的源网协调技术已开展了大量工作，提出了“虚拟同步机”、“友好型电源”等理念，并针对其中的关键技术、难点技术进行了攻关，取得了阶段性的成果^[79-80]。光伏逆变器的低电压穿越技术，是保障大规模光伏接入后电力系统安全稳定运行的重要技术措施^[81-82]，其中，低电压快速检测与锁相^[83-85]、低穿过程中电压和电流控制方法和故障后的功率快速恢复等控制技术^[86-92]，是光伏发电低电压穿越研究的热点。在光伏并网国标^[93]从有功频率、无功电压、低电压穿越、电能质量、紧急无功支撑能力等若干方面对光伏准入提出了要求之后，相关技术的研究也成为一个重要方向。

风光等新能源与常规电源打捆接入及外送已成为我国新能源开发的主要格局。风光新能源与常规电源电气距离较近，交互耦合的表现将影响到电网的安全。风光间歇性电源与常规电源从出力外特性、电源本体、控制性能以及保护配置等都有较大差别，常规电源如何适应风光规模化接入、与其和谐相处，或者大胆设想可能捆绑形成一种性能更优的“等效电源”，以兼容各自的优势。文献[48, 94-96]分别提出了考虑电压约束、稳定约束、调峰和风光互补特性的并网光伏电站极限容量分析方法。

为解决光伏大规模接入后的电力系统安全稳定运行问题，利用风、光的互补特性以及通过储能技术平抑功率波动也是一种可能的技术选择。文献[97-100]分别从经济和技术等方面分析了风光储的优化配比技术；文献[101-103]提出了联合发电系统站端的控制策略。

3.5 提升光伏消纳的精细化光伏预测技术

对光伏电站的输出功率进行精细化预测，把光伏发电容量纳入电网的调度计划和实时调度运行是保证电网稳定经济运行的重要措施之一。国外主要通过两种方式研究：一是以太阳能资源的预测为基础，进而预测光伏发电功率；二是利用天气预报数据直接对光伏电站的输出功率进行预测。德国提出一种基于卫星云图预测地区太阳辐照强度的方法：首先建立地区的净空辐照度模型，然后通过连续多帧卫星云图的处理建立云团运动的矢量域方程，进而预测未来的云指数，并对净空辐照度进行修正，最终得到地区的辐照度预测值，并在此基础上利用模型预测光伏电站的发电功率，目前该

方法对于单个光伏电站日前发电预测的相对均方根误差为36%，而将德国所有光伏电站作为一个整体统计，其均方根误差降低至13%^[104-105]。日本开展了基于神经网络的光伏发电功率预测研究，通过不同类型的人工神经网络进行光伏发电功率的预测，并利用不同类型神经网络混合的方式进行集合预报，该方法的日前功率预测的平均绝对误差在22%左右^[1061-107]。在国内，主流的光伏发电功率预测方法主要分为统计方法和物理方法。统计方法主要是通过对实测气象数据、数值天气预报以及光伏电站有功功率等历史数据进行统计分析，寻找其内在的关系进而建立光伏发电功率预测模型，如BP神经网络^[108-109]、支持向量机^[110-111]等；物理方法主要根据光伏电池板、逆变器等多种设备的特性，得到光伏电站发电功率与数值天气预报的物理关系，进而对光伏电站的发电功率进行预测^[112]。一般来说，统计方法的预测误差在9%~25%，物理方法的预测误差在10%~30%。

3.6 提升光伏消纳的有功无功控制技术

大规模光伏并入电网后，其出力的不确定性增加了电网有功、无功运行控制的难度，需在分析大规模光伏接入对电网运行控制影响基础上，结合光伏电站和调度主站的建设现状，设计适应大规模光伏接入的有功频率控制和无功电压控制系统架构；研究制定光伏数据采集通信机制，提出适应电网多种控制需求的光伏有功/无功控制模式及控制性能评估方法，以此建立横向集成光伏信息采集与监视、光伏有功/无功控制功能，纵向贯穿调度端和厂站端的光伏综合控制系统；将光伏发电纳入大电网自动发电控制（AGC）和自动电压控制（AVC）系统，实现调度主站对光伏电站的有功、无功闭环控制，提升大规模光伏接入后的频率、电压质量以及发电经济性，其中，光伏电站实时信息的上传下达是解决调度控制问题的基础^[113]。

在无功功率控制方面，光伏逆变器普遍实现了有功和无功的解耦控制，文献[114]等提出了将无功功率补偿与光伏并网发电相结合的控制方案，使光伏发电在发有功的同时也能够提供无功；另一个研究热点是无功控制与谐波抑制的统一控制技术研究，文献[115-118]提出了同时实现光伏并网发电、无功及谐波补偿统一控制技术。

在有功功率控制方面，光伏发电可以通过增加储能或偏离最大功率点等方法实现有功功率控制。文献[31]提出了通过光伏发电有功和无功的附加控

制，增加系统的阻尼，抑制电网功率振荡的方法；文献[113]提出了适应大规模光伏接入的有功控制系统架构和设计思路，实现了调度主站对光伏电站的有功闭环控制；文献[119]提出利用附加电压和频率分量的光伏逆变器控制系统使光伏电站具备有功和无功调节能力，以提高电网运行稳定性；文献[120]提出了光伏并网运行功率的直接控制方法，实现光伏有功和无功功率的统一控制，以改善电网供电质量；文献[121]引入蓄电池储能系统实现对光伏发电功率削峰填谷功能。

3.7 下一步研究重点及建议

1) 研究新型输电技术输送光伏等波动性能源的经济性及社会效益；研究新型输电技术适应光伏波动的运行技术；研究新型输电技术输送光伏的优化布局等规划技术。

2) 研究适应大规模光伏的输电系统网架结构优化技术、网架优化原则和方法；研究适应大规模光伏集中接入的送端电源结构和布局优化技术；研究考虑动态性能的光伏置信容量评价方法和指标体系；研究综合考虑社会效益、环境效益的光伏发电容量优化规划和技术经济评价方法。

3) 研究适应大规模分散式接入的智能配电网规划技术，包括系统结构优化方法、光伏电站布点、容量优化以及微网模式的设计等；研究大规模光伏接入后的电能质量监测及治理技术；研究智能配电网背景下接纳分散式光伏的有功、无功控制技术。

4) 研究将大规模光伏纳入、含多时间尺度的广域有功频率控制技术；研究规模化光伏接入的分层分区、多级协调自动电压控制技术；设计大规模光伏接入的有功频率、无功电压控制系统框架及功能；着重研究高压交直流集中外送波动性光伏的有功、无功控制技术。

5) 研究大规模光伏接入后的安全评估技术；研究大规模光伏集中接入高压交直流外送的广域协调安控技术；研究大规模光伏分散式接入后提升供电效果的辅助决策技术。

4 结论

本文从大规模光伏系统的建模与仿真、大规模光伏接入对系统动态和稳态特性的影响、大规模光伏外送及消纳的关键技术三个方面对国内外研究现状进行了归纳、总结；根据作者的思考，提出了进一步研究重点及建议供参考。仍有一些内容如大规模光伏电站的安全监控、鼓励光伏发展和消纳的

政策法规等限于篇幅无法纳入,但值得继续讨论。

参考文献

- [1] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等.大容量并网光伏电站技术综述[J].电力系统自动化,2011,35(12):101-107.
Zhao Zhengming, Lei Yi, He Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107(in Chinese).
- [2] 刘东冉,陈树勇,马敏,等.光伏发电系统模型综述[J].电网技术,2011,35(8):47-52.
Liu Dongran, Chen Shuyong, Ma Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52(in Chinese).
- [3] 苏建徽,余世杰,赵为,等.硅太阳能电池工程用数学模型[J].太阳能学报,2001,22(4):409-412.
Su Jianhui, Yu Shijie, Zhao Wei, et al. Investigation on engineering analytical model of silicon solar cells[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 409-412(in Chinese).
- [4] 李晶,许洪华,赵海翔,等.并网光伏电站动态建模及仿真分析[J].电力系统自动化,2008,32(24):83-87.
Li Jing, Xu Honghua, Zhao Haixiang, et al. Dynamic modeling and simulation of the grid-connected PV power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 83-87(in Chinese).
- [5] 王皓怀,汤涌,侯俊贤,等.风光储联合发电系统的组合建模与等值[J].中国电机工程学报,2011,31(34):1-9.
Wang Haohuai, Tang Yong, Hou Junxian, et al. Composition modeling and equivalence of an integrated power generation system of wind, photovoltaic and energy storage unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 1-9(in Chinese).
- [6] 郑颖楠,王俊平,张霞.基于动态等效阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪控制[J].中国电机工程学报,2011,31(2):111-118.
Zheng Yingnan, Wang Junping, Zhang Xia. Maximum power point tracking control in the photovoltaic power generation based on dynamic equivalent impedance matching theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(2): 111-118(in Chinese).
- [7] 郑飞,张军军,丁明昌.基于RTDS的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略[J].电力系统自动化,2012,36(22):19-24.
Zheng Fei, Zhang Junjun, Ding Mingchang. Low voltage ride through modeling and control strategy for photovoltaic generation system based on RTDS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 19-24(in Chinese).
- [8] 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(14):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(14): 82-86(in Chinese).
- [9] Tan Y T, Kirschen D S, Jenkins N. A model of PV generation suitable for stability analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 748-755.
- [10] Villalva M G, Gazoli J R, Filho E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [11] Li F, Li W, Xue F, et al. Modeling and simulation of large-scale gridconnected photovoltaic system[C]//Proceedings of the Power System Technology of IEEE, Aviva, 2010.
- [12] 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(in Chinese).
- [13] Tan Y T, Kirschen D S. Impact on the power system of a large penetration of photovoltaic generation[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [14] Alquthami T, Ravindra H, Faruque M O. 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, 2010.
- [15] Achilles S, Schramm S, Bebic J. Transmission system performance analysis for high-penetration photovoltaics [R]. USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
- [16] Bebic J. Power system planning: emerging practices suitable for evaluating the impact of high-penetration photovoltaics[R]. USA: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
- [17] Bialasiewicz J T. Renewable energy systems with photovoltaic power generators: operation and modeling [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(7): 2752-2758.
- [18] Paatero J V, Lund P D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks

- [J]. Renewable Energy, 2007, 32: 216-234.
- [19] Yang Weidong, Zhou Xia, Xue Feng. Impacts of large scale and high voltage level photovoltaic penetration on the security and stability of power system[C]//Proceedings of the Centre of the Picture Industry Meeting of IEEE, Chengdu, 2010.
- [20] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 101-107.
- Liang Shuang, Hu Xuehao, Zhang Dongxia, et al. Current status and development trend on capacity credit of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 101-107(in Chinese).
- [21] Egashira R, Tsuji T. A study of system frequency control of island power network using disturbance observer with adaptive behavior controller[C]//Proceeding of the International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, 2009.
- [22] 汪海瑛, 白晓民. 并网光伏的短期运行备用评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 55-60.
- Wang Haiying, Bai Xiaomin. Short-term operation reserve assessment for grid-connected photovoltaic system[J]. Power System Automation, 2013, 37(5): 55-60(in Chinese).
- [23] Widen J, Wackelgard E, Paatero J, et al. Impacts of distributed photovoltaics on network voltages: stochastic simulations of three Swedish low-voltage distribution grids[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(12): 1562-1571.
- [24] Takahashi K, Nakanishi R, Okada K, et al. Load Flow Method for Distribution System and Its Application for High Penetration of PV Generation[C]//Proceeding of the International Conference on Electrical Engineering, Hong Kong, 2009.
- [25] Viet N H, Yokoyama A. Impact of fault ride-through characteristics of high-penetration photovoltaic generation on transient stability[C]//International Conference on Power System Technology, Hangzhou, 2010.
- [26] Liu H, Jin L, Le D, et al. Impact of high penetration of solar photovoltaic generation on power system small signal stability[C]//International Conference on Power System Technology, Hangzhou, 2010.
- [27] 李峰, 李威, 薛峰, 等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 50-56.
- Li Feng, Li Wei, Xue Feng, et al. Quantitative analysis of the transient interaction between large-scale photovoltaic plant and grid[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(11): 50-56(in Chinese).
- [28] Li Wang, Lin Yinghao. Dynamic stability analyses of a photovoltaic array connected to a large utility grid[C]//Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting of IEEE, Singapore, 2000.
- [29] 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, 2001.
- [30] 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.
- [31] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
- Long Yuan, Li Guojie, Cheng Lin, et al. A study on damping power system oscillations based on photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 44-49(in Chinese).
- [32] Villalva M G, Siqueira T D, Ruppert E. Voltage regulation of photovoltaic arrays: small-signal analysis and control design[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(6): 869-880.
- [33] Rodriguez C, Amaratunga G A J. Dynamic stability of grid-connected photovoltaic systems[C]//Proceeding of the Power Engineering Society General Meeting of IEEE, Denver, USA, 2004.
- [34] 黄汉奇, 毛承雄, 陆继明, 等. 光伏发电系统的小信号建模与分析(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 7-14.
- Huang Hanqi, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Small-signal modeling and analysis of grid-connected photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 7-14(in English).
- [35] 董伟杰, 白晓民, 朱宁辉, 等. 间歇式电源并网环境下电能质量问题研究[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1265-1271.
- Dong Weijie, Bai Xiaomin, Zhu Ninghui, et al. Discussion on the power quality under grid-connection of intermittent power sources[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1265-1271(in Chinese).
- [36] Varma R, Salama M. Large-scale photovoltaic solar power integration in transmission and distribution networks[C]//Proceedings of IEEE power and energy society general meeting, Detroit, 2011.
- [37] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50kWp 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 146-151.
- Liu Limin, Cao Zhifeng, Xu Honghua. Design and analysis of 50kWp grid-connected PV station[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27(2): 146-151(in Chinese).
- [38] Turner R, Walton S, Duke R. Stability and bandwidth

- implications of digitally controlled grid-connected parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3685-3694.
- [39] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.
- Yang Ming, Zhou Lin, Zhang Dongxia, et al. Stability analysis of large-Scale photovoltaic power plants for the effect of grid impedance[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223(in Chinese).
- [40] Shih F Y, Chen Y T, Wu Y P, et al. A procedure for designing EMI filters for AC line applications[J]. IEEE Trans on Power Electrics, 1996, 11(1): 170-181.
- [41] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.
- Li Bin, Yuan Yue. Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose, and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 12-17(in Chinese).
- [42] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.
- Yang Guohua, Yao Qi. Simulation study of the influence of photovoltaic power on line protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79(in Chinese).
- [43] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97.
- Huang Wei, Lei Jinyong, Xia Xiang, et al. Study on the influence of distributed generation on phase-to-phase short circuit protection. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 93-97(in Chinese).
- [44] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.
- Wang Jianghai, Tai Nengling, Song Kai, et al. Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43(in Chinese).
- [45] 花丽丹, 陆于平, 吴罡, 等. DG容量在分布式发电中对数字保护影响的研究[J]. 中国电力, 2008, 41(3): 12-16.
- Hua Lidan, Lu Yuping, Wu Gang. Study on the effect of distributed generation size on digital protective device in distribution system[J]. Electric Power, 2008, 41(3): 12-16(in Chinese).
- [46] 孙鸣, 赵月灵, 王磊. DG容量及接入方式对变电站继电保护定值的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 46-49.
- Sun Ming, Zhao Yueling, Wang Lei. Impact of DG capacity and location on relay protection of substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 46-49(in Chinese).
- [47] 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(in Chinese).
- [48] 丁明, 刘盛. 基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 922-926.
- Ding Ming, Liu Sheng. Calculation of maximum penetration level of multi pv generation systems[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 922-926(in Chinese).
- [49] Peas Lopes J A, Moreira C L, Madureira A G. Defining control strategies for microgrids island operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 916-924.
- [50] Hawkes A D, Leach M A. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid[J]. Applied Energy, 2009, 86(17): 1253-1265.
- [51] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-248.
- Chen Quan, Li Lingdong, Wang Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-248(in Chinese).
- [52] 许晓艳, 黄越辉, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
- Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, Liu Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits [J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146(in Chinese).
- [53] Shahriari S A A, Abapour M, Yazdian A, et al. Minimizing the impact of distributed generation on distribution protection system by solid state fault current limiter[C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, 2010.
- [54] 杨冬, 刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 1-5.
- Yang Dong, Liu Yutian. Preliminary discussion on China transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 1-5(in Chinese).
- [55] 丁冠军, 丁明, 汤广福. VSC-HVDC主电路拓扑及其调制策略分析与比较[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 64-68.
- Ding Guanjuan, Ding Ming, Tang Guangfu. Analysis and comparison of VSC-HVDC topologies and corresponding

- modulation schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 64-68(in Chinese).
- [56] 丁冠军, 汤广福, 丁明, 等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.
- Ding Guanjun, Tang Guangfu, Ding Ming, et al. Topology mechanism and modulation scheme of a new multilevel voltage source converter modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 1-8(in Chinese).
- [57] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
- Ding Guanjun, Ding Ming, Tang Guangfu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6(in Chinese).
- [58] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41-45.
- Zhao Weiran, Li Guanghui, He Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 41-45(in Chinese).
- [59] Khatib T, Mohamed A, Sopian K. A review of photovoltaic systems size optimization techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 22: 454-465.
- [60] Ould Bilal B, Sambou V, Ndiaye P A, et al. Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP)[J]. Renewable Energy, 2010, 35(10): 2388-2390.
- [61] Ekren O, Ekren B Y. Size optimization of a pv/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing[J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 592-598.
- [62] Khatib T, Mohamed A, Sopian K, et al. A new approach for optimal sizing of standalone photovoltaic systems[J]. International Journal of Photoenergy, 2012.
- [63] Lin C H, Hsieh W L, Chen C S, et al. Optimization of photovoltaic penetration in distribution systems considering annual duration curve of solar irradiation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1090-1097.
- [64] Zhang P, Li W, Li S, et al. Reliability assessment of photovoltaic power systems: Review of current status and future perspectives[J]. Applied Energy, 2013, 104: 822-833.
- [65] Perez R, Taylor M, Hoff T, et al. Reaching consensus in the definition of photovoltaics capacity credit in the usa: A practical application of satellite-derived solar resource data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2008, 1(1): 28-33.
- [66] Park J, Liang W, Choi J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, 2009.
- [67] 汪海瑛, 白晓民, 马纲. 并网光伏电站的发电可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 1-5.
- Wang Haiying, Bai Xiaomin, Ma Gang. Reliability assessment of grid-integrated solar photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 1-5(in Chinese).
- [68] 张轶, 鲁国起, 张焰, 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(in Chinese).
- [69] Duignan R, Dent C J, Mills A, et al. Capacity value of solar power[C]//Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA, 2012.
- [70] Madaeni S H, Sioshansi R, Denholm P. Comparing capacity value estimation techniques for photovoltaic solar power[J]. IEEE Transactions on Photovoltaics, 2013, 3(1): 407-415.
- [71] Rajkumar R K, Ramachandramurthy V K, Yong B L, et al. Techno-economical optimization of hybrid pv/wind/battery system using Neuro-Fuzzy[J]. Energy, 2011, 36(8): 5148-5153.
- [72] S. Lu, R. Diao, N. Samaan, P. Etingov Capacity, Value of PV and Wind Generation in the NV Energy System[R], U.S. Department of Energy, 2012.
- [73] Wong S, Bhattacharya K, Fuller J D. Long-term effects of feed-in tariffs and carbon taxes on distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1241-1253.
- [74] 曹石亚, 李琼慧, 黄碧斌, 等. 光伏发电技术经济分析及发展预测[J]. 中国电力, 2012, 45(8): 64-68.
- Cao Shiya, Li Qionghui, Huang Bibin, et al. Economic analysis and development forecast of photovoltaic power technology[J]. Electric Power, 2012, 45(8): 64-68(in Chinese).
- [75] Poullikkas A. Parametric cost-benefit analysis for the installation of photovoltaic parks in the island of Cyprus[J]. Energy policy, 2009, 37(9): 3673-3680.
- [76] 胡泊, 辛颂旭, 白建华, 等. 我国太阳能发电开发及消纳相关问题研究[J]. 中国电力, 2013, 46(1): 1-6.
- Hu Bo, Xin Songxu, Bai Jianhua, et al. Study on issues

- concerning solar power development and accommodation in China[J]. *Electric Power*, 2013, 46(1): 1-6(in Chinese).
- [77] Zakaria Z A, Chen B C, Mohammed Osman Hassan. Modeling of Photovoltaic Power Plants[C]//In proceeding of Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 2008.
- [78] Solomon A A, Faiman D, Meron G. Properties and uses of storage for enhancing the grid penetration of very large photovoltaic systems[J]. *Energy Policy*, 2010(38): 5208-5222.
- [79] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(24): 1-12.
- Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Tang Shengqin, et al. An overview on advanced grid-connected inverters used for decentralized renewable energy resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(24): 1-12(in Chinese).
- [80] 丁明, 杨向真, 苏建徽. 基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(8): 89-93.
- Ding Ming, Yang Xiangzhen, Su Jianhui. Control strategies of inverters based on virtual synchronous generator in a microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(8): 89-93(in Chinese).
- [81] 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, Detroit, 2009.
- [82] Gazi M I, Ahmed A, Mueen S M. Low voltage ride through capability enhancement of grid connected large scale photovoltaic system[C]. *Proceedings of IECON*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2011.
- [83] Kumsuwan Y, Sillapawicharn Y. A fast synchronously rotating reference frame-based voltage sag detection under practical grid voltages for voltage sag compensation systems[C]//Proceedings of 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Chiang Mai, Thailand, 2012.
- [84] Kamble S, Thorat C. A New algorithm for voltage sag detection[C]. *Proceedings of ICAESM*, Nagapattinam, Tamil Nadu, 2012.
- [85] 袁旭峰, 程时杰, 文劭宇. 改进瞬时对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(1): 52-58.
- Yuan Xufeng, Cheng Shijie, Wen Jinyu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(1): 52-58(in Chinese).
- [86] Lin C M, Young C M, Yeh W S, et al. An LVRT control strategy for reducing DC-link voltage fluctuation of a two-stage photovoltaic multilevel inverter[C]//IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Kitakyushu, 2013.
- [87] Zhang Y, Ma L, Zheng T Q. Application of feedback linearization strategy in voltage fault ride-through for photovoltaic inverters[C]//37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, 2011.
- [88] Azevedo G M S, Vazquez G, Luna A, et al. Photovoltaic inverters with fault ride-through Capability[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Seoul, 2009.
- [89] Tian H, Gao F, Ma C. Advanced performance control of two-stage grid-tied photovoltaic inverter with fast energy storage component[C]//Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aalborg, 2012.
- [90] Alepuz S, Busquets-Monge S, Bordonau J, et al. Control strategies based on symmetrical components for grid connected converters under voltage dips[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56: 2162-2173.
- [91] Magueed F A, Sannino A, Svensson J. Transient performance of voltage source converter under unbalanced voltage dips[C]//Power Electronics Specialists Conference, 2004.
- [92] Tian H, Gao F, He G, et al. Low voltage ride through of two-stage photovoltaic inverter with enhanced operational performance[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, 2012.
- [93] 中国电力科学研究院等, GB/T 19964-2012. 光伏电站接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- China Electric Power Research Institute et al, GB/T 19964-2012. Technical requirements for connecting photovoltaic power station to power system[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013(in Chinese).
- [94] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(8): 971-975.
- Wang Yibo, Li Jing, Xu Honghua. Analysis of the maximum installed capacity of PV station constrained by power system security and stability[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2008, 29(8): 971-975(in Chinese).
- [95] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(22): 22-28.
- Wang Yibo, Xu Honghua. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(22): 22-28(in Chinese).
- [96] 蒋平, 严栋, 吴熙. 考虑风光互补的间歇性能源准入功

- 率极限研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1965-1970.
Jiang Ping, Yan Dong, Wu Xi. Research on penetration level of intermittent energy considering wind and pv hybrid system[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1965-1970(in Chinese).
- [97] 梅生伟, 王莹莹, 刘锋. 风—光—储混合电力系统的博弈论规划模型与分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 13-19.
Mei Shengwei, Wang Yingying, Liu Feng. A game theory based planning model and analysis for hybrid power system with wind generators-photovoltaic panels-storage batteries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 13-19(in Chinese).
- [98] 李碧辉, 申洪, 汤涌, 等. 风光储联合发电系统储能容量对有功功率的影响及评价指标[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 123-128.
Li Bihui, Shen Hong, Tang Yong, et al. Impacts of energy storage capacity configuration of hpws to active power characteristics and its relevant indices[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 123-128(in Chinese).
- [99] 丁明, 徐宁舟, 毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 66-72.
Ding Ming, Xu Ningzhou, Bi Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 66-72(in Chinese).
- [100] Kaabeche A, Belhamel M, Ibtouen R. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system[J]. Energy, 2011, 36(2): 1214-1222.
- [101] 齐志远, 王生铁, 田桂珍. 风光互补发电系统的协调控制[J]. 太阳能学报, 2010, 31(5): 654-660.
Qi Zhiyuan, Wang Shengtie, Tian Guizhen. Coordination control of wind/pv hybrid system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2010, 31(5): 654-660(in Chinese).
- [102] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.
Gao Mingjie, Hui Dong, Gao Zonghe, et al. Presentation of national wind/photovoltaic/energy storage and transmission demonstration project and analysis of typical operation modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 59-64(in Chinese).
- [103] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
Zhang Buhan, Zeng Jie, Mao Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58(in Chinese).
- [104] Hammer A, Heinemann D, Lorenz E. Short-term forecasting of solar radiation: a statistical approach using satellite data[J]. Solar Energy, 1999, 67(1-3): 139-150.
- [105] Lorenz E, Hurka J, Heinemann D, et al. Irradiance forecasting for the power prediction of grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2009, 2(1): 2-10.
- [106] Yona A, Senjyu T, Funabashi T. Application of recurrent neural network to short-term-ahead generating power forecasting for photovoltaic system[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [107] Chaouachi A, Kamel R M, Nagasaka K. Neural network ensemble-based solar power generation short-term forecasting[J]. JACIII, 2010, 14(1): 69-75.
- [108] 卢静, 翟海青, 刘纯, 等. 光伏发电功率预测统计方法研究[J]. 华东电力, 2010, 38(4): 563-567.
Lu Jing, Zhai Haiqing, Liu Chun, et al. Study on statistical method for predicting photovoltaic generation power [J]. East China Electric Power, 2010, 38(4): 563-567(in Chinese).
- [109] 丁明, 王磊, 毕锐. 基于改进 BP 神经网络的光伏发电系统输出功率短期预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 93-99.
Ding Ming, Wang Lei, Bi Rui. A short-term prediction model to forecast output power of photovoltaic system based on improved BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 93-99(in Chinese).
- [110] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 74-79.
Li Ran, Li Guangmin. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression technique[J]. Electric Power, 2008, 41(2): 74-79(in Chinese).
- [111] 朱永强, 田军. 最小二乘支持向量机在光伏功率预测中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 54-59.
Zhu Yongqiang, Tian Jun. Application of least square support vector machine in photovoltaic power forecasting [J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 54-59(in Chinese).
- [112] 卢静, 翟海青, 冯双磊, 等. 光伏发电功率预测方法的探索[J]. 华东电力, 2013, 41(2): 380-384.
Lu Jing, Zhai Haiqing, Feng Suanglei, et al. Physical method for photovoltaic power prediction[J]. East China Electric Power, 2013, 41(2): 380-384(in Chinese).
- [113] 徐瑞, 滕贤亮, 张小白, 等. 大规模光伏有功综合控制系统设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 24-29.
Xu Rui, Teng Xianliang, Zhang Xiaobai, et al. Study on

- issues concerning solar-power development and accommodation in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 24-29(in Chinese).
- [114] 汪海宁, 苏建徽, 张国荣, 等. 光伏并网发电及无功补偿的统一控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 114-118.
- Wang Haining, Su Jianhui, Zhang Guorong, et al. Unitive control of PV grid connected generation and reactive compensation[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 114-118(in Chinese).
- [115] Han B, Bae B, Kim H, et al. Combined operation of unified power-quality conditioner with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 330-338.
- [116] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 61-66.
- Zhang Guorong, Zhang Tieliang, Ding Ming, et al. Combined control of active power filter and PV grid connected generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 61-66(in Chinese).
- [117] 汪海宁, 苏建徽, 张国荣, 等. 具有无功功率补偿和谐波抑制的光伏并网功率调节器控制研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6): 540-544.
- Wang Haining, Su Jianhui, Zhang Guorong, et al. Study on PV grid connected power conditioner with reactive power compensation and harmonic restrain[J]. Acta Energaiae Solaris Sinica, 2006, 27(6): 540-544(in Chinese).
- [118] 杜春水, 张承慧, 刘鑫正, 等. 带有源电力滤波功能的三相光伏并网发电系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2010(9): 163-169.
- Du Chunshui, Zhang Chenghui, Liu Xinzheng, et al. Control strategy on the three-phase grid-connected photovoltaic generation system with shunt active power filter[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2010(9): 163-169(in Chinese).
- [119] 何国庆, 许晓艳, 黄越辉, 等. 大规模光伏电站控制策略对孤立电网稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 24(15): 20-25.
- He Guoqing, Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, et al. Impact on stability of isolated grid of different control strategies of large photovoltaic station[J]. Power System Technology, 2009, 24(15): 20-25(in Chinese).
- [120] 陈树勇, 鲍海, 吴春洋, 等. 分布式光伏发电并网功率直接控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 6-11.
- Chen Shuyong, Bao Hai, Wu Chunyang, et al. Direct grid-tie power control method for distributed photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 6-11(in Chinese).
- [121] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-33.
- Qiu Peichun, Ge Baoming, Bi Daqiang. Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33(in Chinese).



丁明

收稿日期: 2013-12-04。

作者简介:

丁明(1956), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真与控制等, mingding56@126.com;



王伟胜

王伟胜(1968), 男, 工学博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 新能源发电及其并网技术, wangws@epri.sgcc.com.cn;



王秀丽

王秀丽(1961), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统规划、可靠性和电力市场, xiuliw@mail.xjtu.edu.cn;



宋云亭

宋云亭(1972), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统规划与可靠性、电力系统分析与控制, syt@epri.sgcc.com.cn;



陈得治

陈得治(1974), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网及大电网安全稳定分析, chendz@epri.sgcc.com.cn;



孙鸣

孙鸣(1957), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 继电保护与调度自动化、分布式发电与用户电力技术, hfsunming@sina.com。

(责任编辑 韩蕾)