分布式光伏高比例接入的国外经验及实践启示

曹炜，董浩洋，李芸，卫皇莅，高生凯
（上海电力大学 电力工程学院，上海 200090）

摘要：分布式光伏接入电网比例逐渐提高，为电网带来一系列问题，可借鉴国外经验为解决相关问题提供实践参考。首先，总结了作为欧洲能源转型先行国之一的德国在可再生能源法案和分布式光伏接入标准等方面的相关经验。然后，梳理了英国伦敦“8·9”停电事故案例中分布式光伏及其防孤岛保护在事故进程中的表现及产生的影响。最后，结合相关国外经验、我国可再生能源发展政策、分布式光伏高比例接入对电网运行带来的问题，针对配网电压分布及控制、分布式电源接入标准、防孤岛保护和用户侧分布式光伏业主利益与电网运行协调等方面提出了相关建议。

关键词：分布式；光伏；高比例接入；可再生能源 ；防孤岛保护
中图分类号：TM715 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd22454

Foreign Experience and Practical Enlightenment of the High Proportion Access of Distributed Photovoltaic High-proportion

CAO Wei，DONG Haoyang，LI Yun，WEI Huangli，GAO Shengkai
（*School of Electrical Engineering*，*Shanghai University of Electric Power*，*Shanghai* 200090，*China*）

Abstract: The proportion of distributed photovoltaic connected to the grid is gradually increasing，which brings a series of problems，it can draw lessons from foreign experience to provide practical reference for solving relevant problems. As one of the leading countries of energy transformation in Europe，Germany's experience in renewable energy act and distributed photovoltaic access standards was summarized. Then，the performance and impact of distributed photovoltaic and anti-islanding protection in the process of the "8·9" blackout case in London，UK was combed. Finally，combined with the relevant foreign experience，renewable energy development policy of China，and the problems caused by the high proportion access of distributed photovoltaic to grid operation，some suggestions on voltage distribution and control of distribution network，access standard of distributed generation，anti-islanding protection，coordination between owners' interests of distributed photovoltaic by user side and grid operation were put forward.

Key words: distributed；photovoltaic；high proportion access；renewable energy；anti-islanding protection

目前，以光伏、风电为代表的新能源大力发展，逐渐减少一次能源消耗及污染物的排放，在全球能源问题和环境问题中发挥着至关重要的作用[1-3]。目前，我国已经成为全球新能源规模最大、发展最快的国家[4]。但是随着分布式光伏接入比例的提升，对我国电网运行也产生一定的挑战[5-9]。

我国经济发达、人口稠密的负荷密集区，光伏发展具有分布式、集中式并重的特点，华东区域正是这样。2019年华东电网分布式光伏装机容量约达23 GW，占光伏总装机的46.7%和全网总装机的6.3%。同时，随着国家“光伏扶贫”的推进以及分布式光伏相关激励政策的出台，分布式已成为华东电网光伏发展的重要趋势，部分地区已出现分布式光伏发电功率倒送主网的情况（即可认为该部分地区的分布式光伏接入水准已达到较高比例），相关配电网的无功平衡、电压控制、分布式光伏接入标准和防孤岛保护等潜在问

基金项目：国家自然科学基金青年自然基金（51807114）
作者简介：曹炜（1963—），女，博士，副教授，Email：cw-jenny@163.com
通讯作者：董浩洋（1996—），男，硕士研究生，Email：dong.haoyang@foxmail.com

题逐渐凸显。

德国作为欧洲能源转型的先行国之一，2002年—2019年期间光伏总装机完成了从0.3 GW至49 GW的转变，分别占同年德国总装机的0.27%和23.5%[10]，而分布式光伏装机2019年已达光伏总装机的95%以上，并仍具有良好的发展潜力。一项德国联邦交通和数字基础设施部（federal ministry of transport and digital infrastructure）委托的研究估计德国具有150 GW的屋顶光伏潜力和143 GW的地面光伏潜力，考虑电源组合经济优化后，德国联邦经济事务与能源部（federal ministry for economic affairs and energy）于2018年10月提出了2030年和2050年光伏总装机分别达到100 GW和200 GW的计划[11]。此外，2014年德国部分地区已出现分布式光伏功率倒送主网的现象，且根据预测2024年这种现象会进一步增加，德国经验对我国部分电网应对分布式光伏大量接入面临的问题具有极大的参考意义。

此外，随着分布式光伏高比例接入，会出现电网故障中分布式光伏脱网，加剧电力系统功率不平衡、加快系统频率下降进程的现象。英国2019年8月9日发生的大停电事故暂态过程中，分布式光伏脱网3批次，出力损失累计达700 MW，占低频减载保护触发前出力损失的37%以及全程总出力损失的33.7%。分布式光伏脱网在一定程度上加速触发了该电网频率下降速率，加快了低频减载保护动作，最终造成约110万用户（约1 000 MW负荷）在15～45 min内停电。事故后，英国电网加速了分布式光伏的防孤岛保护改进进程[12-14]。英国此次停电事故的经验与教训对我国电网的分布式光伏接入管理也具有一定的借鉴意义。

文章收集梳理德国等分布式光伏高比例接入电网的实践经验与教训，针对我国部分电网面临的类似挑战，提出相关应对建议。

1　德国光伏发展经验

德国以分布式为主的光伏电源，正在逐步改变德国电网的负荷分布状况。2014年德国部分地区已呈现负负荷情况（即分布式光伏功率倒送主网），预计2024年德国大部分地区均会呈现该现象[15]，负荷情况如图1所示。德国光伏稳定快速的发展既得益于德国一系列与时俱进不断更新的、极具可操作性的能源法案的引领，也得益于具有法案支撑的、对分布式光伏明确具体的接入管理。

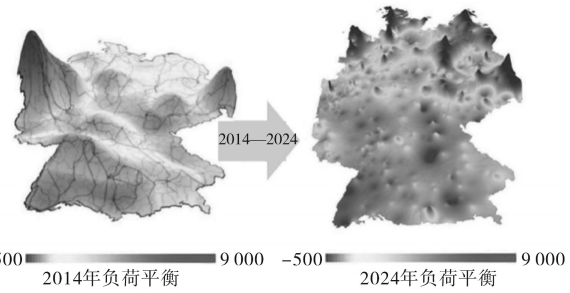

图1　德国2014年以及预测2024年电网负荷情况

Fig.1　Germany 2014 and forecasted 2024 grid load situation

1.1　法案引领

德国于2000年开始颁布实施可再生能源法案《可再生能源法（EEG）》（erneuerbare-energien-gesetz（德）），其后根据能源转型进程和光伏发展的实际情况，进行不定期的修订和完善[16-22]。

该法案意味着光伏相对传统能源获得更优先的发电权，并且获得20 a以上的固定“上网电价（feed-in tariff，FIT）”，除了出售给运营商的批发收入以外，还可以向电力用户收取额外的可再生能源税（EEG附加税）。

为进一步推动光伏的快速发展，《可再生能源法 2004》提高对光伏发电的补贴以及取消对电力供应商的新能源发电设备的补贴限制，使得2004年—2009年期间，光伏装机容量大幅增加，其年平均光伏装机增加率高达74.5%，截至2009年底光伏总装机已达到2004年光伏总装机的9.6倍[18]。同时，光伏容量的飞速增长以及高昂的光伏补贴给德国电网带来一定的挑战。为了保证光伏的稳定发展，《可再生能源法 2009》规定光伏发电补贴逐年降低[19]；《可再生能源法 2014》规定部分光伏项目需自行通过电力市场消纳[20]；《可再生能源法 2016/2017》规定逐渐取消绿色电力入网价格补贴，并将采用招投标模式确定对光伏项目的建设与补贴资助[21-22]。

德国的一系列《可再生能源法》中提到的可再生能源消纳措施具体而微，极具可操作性。例如，在《可再生能源法 2017》中有如下规定（此前在《可再生能源法 2014》中也有所提及）：

1）容量在30～100 kW之间的光伏装置在系统过载时可远程控制削减发电；

2）容量小于30 kW的光伏装置系统过载时可远程控制削减发电或者将有效发电功率控制在总容量的70%以下（一个地块或一栋楼里的都应该算一个光伏装置）。

此外，还有其它的法案和《可再生能源法》相配合，例如：《德国能源法EnWG》规定了配电系统运营商应向与之签订了网络使用合同的低压供应商和最终用户削减电网费用，以换取对电网最终可中断负荷的控制权等[23]。

再如，《计量点操作法（the metering point operation act）》规定了智能测量系统的安装标准及收费标准[24]：

1）年耗电量达6 000 kW·h的消费者需加装智能测量系统，且从2017年起8 a内，根据总耗电量的不同（6～100 MW·h），每年收取不同的费用（100～200欧元）；

2）年耗电量不超过6 MW·h的消费者需加装智能测量系统，且根据年耗电量的不同（不超过2～6 MW·h），每年收取不同的费用（23～60欧元）；

3）装机容量超过7 kW的用户需加装智能测量系统，且从2017年起根据每年总装机容量的不同（7～100 kW），收取不同的费用（100～200欧元）；

4）装机容量不超过7 kW的用户，且从2018年起新装机部分都将加装智能测量系统，每年收取费用不超过60欧元；

这些法案为分布式光伏发展提供了坚实的法律依据，规范了电网运行商和光伏业主的行为，推动并保障了德国分布式光伏的健康发展。

1.2　德国的分布式光伏接入管理

以上述极具可操作性的一系列法案为依托，德国先后制定了《中、低压配电网并网技术标准（VDE-AR-N 4110/4105）》等，包含了有功控制、无功能力、电能质量、保护配置和电网故障分析等各个方面，部分相关内容介绍如下[25-27]。

1.2.1　电压幅值

规定了电网中每个公共连接点的电压幅值变化跟没有连接分布式光伏时相比不能超过2%，低压并网标准要求不得超过3%。

1.2.2　无功调节

规定了并网点功率因数应在某个范围内可调（根据并网容量分为−0.9～+0.9或−0.95～+0.95）；对于特别小的分布式光伏，要求其功率因数固定即可。例如德国《低压配电网并网技术标准》对3.68 kV·A≤S≤13.8 kV·A的分布式光伏要求如图2斜线扇形区域所示的有功无功运行范围，对应的功率因数从−0.95～+0.95；当有功功率在20%额定功率之下时，对功率因数没有要求[27]。

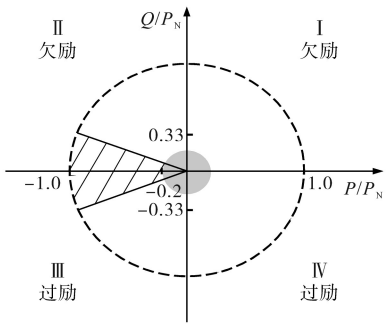

图2　德国《低压配电网并网技术标准》中3.68 kV·A≤S≤13.8 kV·A时的功率因数范围（−0.95～+0.95）

Fig.2　The power factor range（−0.95～+0.95）for 3.68 kV·A≤S≤13.8 kV·A in German"technical standards for low-voltage distribution network grid connection"

这意味着当分布式光伏发出较高的有功功率造成并网点电压升高时，分布式光伏可以吸收部分无功功率来降低电压；反之分布式光伏可以发出部分无功功率以支撑电压。这样就在一定程度上缓解了波动性电源就地并网时带来的电压波动问题，在不集中安装无功补偿设备的情况下，分布式光伏可以利用其无功能力进行电网电压调节，提高电压合格率[28-30]。

1.2.3　系统安全与保护

规定了分布式光伏的保护装置应具备高、低压保护和过、欠频保护等，相关设置如表1所示。

表1　分布式光伏涉网保护设置

Tab.1　Distributed photovoltaic grid protection settings

保护名称	中压电网		低压电网	
	推荐保护定值	保护动作时间/ms	保护定值	保护动作时间/ms
低压保护	0.8U_N	1 000	0.8U_N	<100
高压保护	1.25U_N	100	1.1U_N	<100
欠频保护	47.5 Hz	≤100	47.5 Hz	<100
过频保护	51.5 Hz	5 000	51.5 Hz	<100

2　英国伦敦"8·9"大停电事故中的分布式光伏

2.1　事故前电网相关情况

停电事故发生前，英国同步电网具有29 GW负荷、32 GW接入输电网的发电容量和10.5 GW接入配电网的分布式光伏发电容量，具有约210 GV·A·s动能[12]。发电组成如图3所示。

此外该事故前英国电网相关保护措施如下[11]：

防孤岛保护。英国的分布式光伏防孤岛保护有两种形式，包括约有8 500 MW的频率变化率（rate of change of frequency，RoCoF）保护和约有2 000 MW的相位偏移（vector shift）保护。对于5 MW及以上光伏电站RoCoF保护触发阈值已由

过去的0.125 Hz/s改为1 Hz/s;5 MW以下的分布式光伏电站保护触发阈值仍为0.125 Hz/s。

低频减载(low frequency demand disconnection,LFDD)。英国国家电网公司部署的系统LFDD措施,是按照电网规程(Grid Code.A.5.5.1)[31]要求的阈值分轮次进行的。英格兰及威尔士区域在频率下降至48.8 Hz时自动减载5%的负荷,苏格兰区域在频率下降至48.6 Hz时才会自动减载5%的负荷。

频率响应措施。根据英国系统安全与供电质量标准(security and quality of supply standard,SQSS)[32]对电网频率的要求:1)系统稳态频率需控制在49.5~50.5 Hz之间;2)暂态期间频率高于50.5 Hz或低于49.5 Hz的时间不超过60 s,同时系统需具备抵御1 000 MW发电损失和560 MW负荷损失的能力。

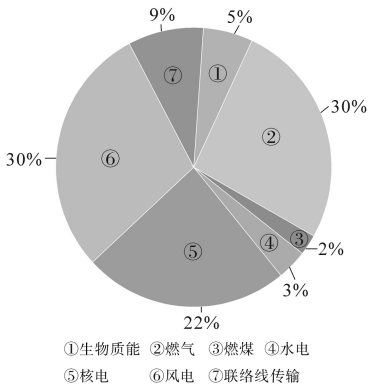

图3 英国"8·9"事故前接入输电网的发电组合情况

Fig.3 The combination of power generation connected to the transmission grid before the"8·9"accident in the UK

2.2 事故过程中的分布式光伏损失

事故过程中的事件顺序和事故频率曲线如图4所示,其中分布式光伏的损失可分为以下三个部分:

1)短路期间的损失。短路故障期间分布式光伏的相位移动防孤岛保护动作造成了150 MW的分布式光伏发电损失。

2)第1波频率下降中的损失。故障清除后,霍恩(Hornsean)风电厂和小巴福(Little Barford)燃气电厂分别出现发电损失,加上短路期间的分布式光伏损失累计量已超过SQSS规定的最大可抵御功率损失量(1 000 MW),频率发生大幅度下降(实测值约为0.16 Hz/s),引起容量5 MW以下的部分分布式光伏频率变化率防孤岛保护动作,造成350 MW的分布式光伏发电损失。同时,一次频率响应开始启动,频率止跌于49.1 Hz,开始回升。

3)第2波频率下降中的损失。频率回升过程中,小巴福燃气电厂的第2次发电损失,使得累计发电损失(1 691 MW)超过频率响应工作极限,频率再次大幅下降。当频率下降至49 Hz时,因部分负荷低频减载的提前触发,在切除该部分负荷的同时切除了其中的分布式光伏,造成了200 MW的净分布式光伏发电损失,加剧了频率下降。频率下降至48.8 Hz时触发低频减载保护自动切除5%的负荷,造成本次大停电事故。

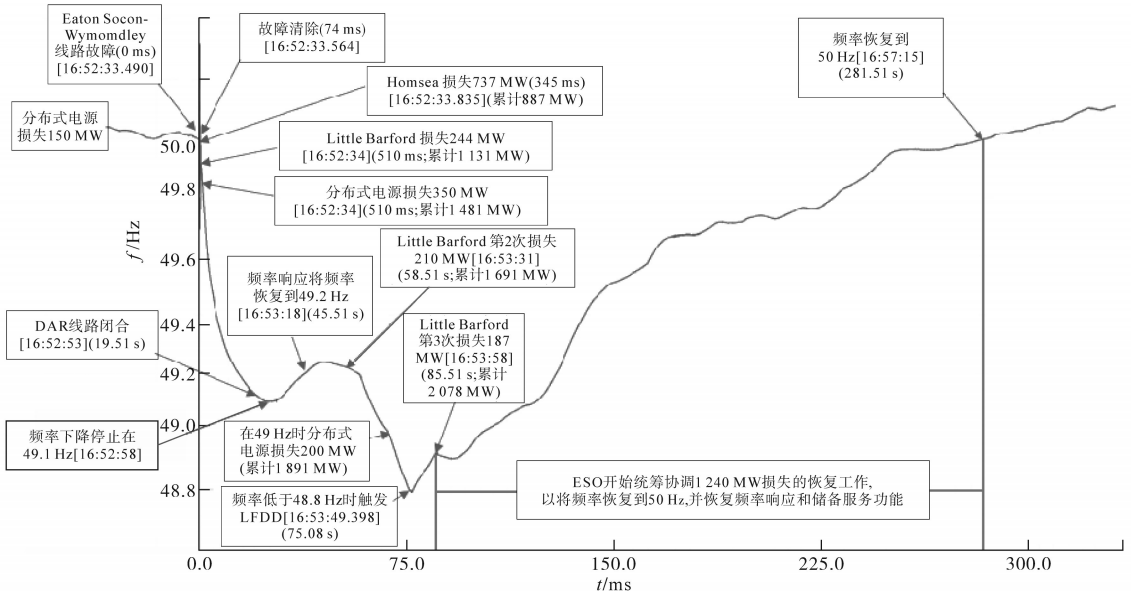

图4 英国"8·9"事故频率变化曲线及相关事件

Fig.4 The frequency curve of the"8·9"accident in the UK and related events

2.3　事故中分布式光伏对事故进程的影响分析和后续措施

英国“8·9”事故短路过程和频率下降过程中的分布式光伏出力损失对频率下降起推波助澜的作用。事故全程中,分布式光伏先后因电压相位移动防孤岛保护、频率变化率防孤岛保护和所在负荷区低频减载保护提前触发造成分布式光伏发电损失共计700 MW,占低频减载保护触发前各种电源累计出力总损失(1 891 MW)的37%。表2给出了随事故进程各事件累计的发电功率损失和不计频率一次调节时的频率下降率,后者由发电机转子运动方程推演计算所得,计算公式如下式所示[13]:

$$\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}=\frac{\Delta P\cdot f_{\mathrm{N}}}{2W_{\mathrm{k}}} \tag{1}$$

式中:ΔP为系统功率缺额,MW;f_{N}为系统额定频率,50 Hz;W_{k}为系统动能,210 GV·A·s。

假设5 MW以下的分布式光伏在事故发生前已将频率变化率防孤岛保护的整定值从0.125 Hz/s更改为1 Hz/s,且较老式的相位偏移保护也更改为频率变化率保护,那么可以避免第1波频率下降阶段中的分布式光伏脱网(500 MW),此时累计发电损失将为981 MW。即使随后累加小巴福燃气电厂的第2次发电损失(210 MW),累计发电损失也仅为1 191 MW,远小于第1波频率下降过程中止跌于49.1 Hz时的累计发电损失(1 481 MW),即该数值未达到1次频率响应的工作极限,可能将不会造成第2波的频率下降[13](小巴福燃气电厂的第3次发电损失187 MW是源于英国电网运营商的主动要求,并非不可控的被动损失),从而不会引起低频减载保护的触发而造成大量用户停电。

事故后,英国电网运营商综合各事故相关方的详细报告公布了关于事故的最终报告(Technical Report on the events of 9 August 2019)[12],指出整个事故过程中的所有继电保护和自动装置都正常动作,事故处理符合规范,但仍需平衡考虑安全风险与成本,重新审查国家电力传输系统安全与供电质量标准(SQSS)以确定是否在电力系统中提供更高的弹性标准,并加快5 MW以下的分布式光伏防孤岛保护设定值的变更(由过去的0.125 Hz/s,更改为1 Hz/s)。

由此次大停电事故可见,分布式光伏防孤岛如果采用频率变化率保护,则其启动值应大于电网安全标准中规定的可抵御的最大发电损失可能引起的频率下降率,避免因分布式光伏在电网频率下降的暂态过程中切出而加剧电网的有功不足、恶化频率下降速率和事故进程。

表2　事故中电源非主动损失序列

Tab.2　Power non-active loss sequence in accident

相对时间	非主动事件顺序	损失电源功率/MW	累计损失电源功率/MW	理论计算频率变化率/(Hz·s^{-1})	不计分布式光伏的累计损失电源功率/MW	不计分布式光伏的理论计算频率变化率/(Hz·s^{-1})	备注
0 ms	单相短路	\	\	\	\	\	\
\	分布式光伏	150	150	\	\	\	短路期间由相位偏移防孤岛保护动作切除
345 ms	霍恩电厂	737	887	0.106	737	0.088	故障清除后第1波下跌,实际约0.16 Hz/s,频率变化率防孤岛保护动作切除
510 ms	小巴福电厂	244	1 131	0.135	981	0.117	
510 ms	分布式光伏	350	1 481	0.176	\	\	
58.51 s	小巴福电厂	210	1 691	0.201	1 191	0.142	一次调频起作用后第2波下跌,实际仅为0.02 Hz/s
49 Hz时	分布式光伏	200	1 891	0.225	\	\	低频减载提前触发

3　我国可再生能源政策和分布式光伏高比例接入对电网的影响及相关建议

3.1　我国能源政策

我国于2005年2月28日发布了《中华人民共和国可再生能源法》,并于2006年1月1日起开始正式实施,之后根据我国可再生能源发展情况展开了一系列的修订[33-36]以及发布了配套的《可再生能源发电全额保障性收购管理办法》[37]。

《中华人民共和国可再生能源法》为可再生能源在能源领域的开发提供了优先级。此外,全额收购可再生能源的上网电量、成立可再生能源发展专项资金和对部分可再生能源项目给予税收优惠,都为我国可再生能源发展的初期提供了强有力的支撑。

2009年修订发布的《中华人民共和国可再生能源法(修订案)》[33]确定了可再生能源在电网调度中的优先级,并制定了可再生能源应达到的发电量占总发电量的比重。同时,为了保证电网安全,规定了全额收购的可再生能源应符合相应的并网标准。

2016年发布的《可再生能源发电全额保障性收购管理办法》[37]更是细化了全额保障性收购可再生能源的各项规定。在规定了保障性收购可再生能源发电量范围的同时,也提出以将超额电量通过市场交易并给予相应可再生能源电价补贴的方式,鼓励可再生能源多发满发。此外,为促进分布式光伏等能源的发展,对其所发电量仍采取全额收购政策。

得力于我国法案对可再生能源发展的大力支持,截止到2019年底,我国的风电总装机容量和光伏总装机容量分别达到210 GW和204 GW,均位居全球第一。此外,2020年修订发布的《中华人民共和国可再生能源法(征求意见稿)》[34]制定了可再生能源发展的中长期目标,并提出将全额保障性收购可再生能源的方式逐渐更改为各级市场主体需完成最低比重的可再生能源发电量消纳指标,未完成消纳指标的市场主体可通过市场交易履行其义务,为我国未来可再生能源的消纳与发展提供了更多选择和保障。

3.2 分布式光伏高比例接入的影响

随着我国能源政策的不断推进,分布式光伏进入大规模发展时期,但其高比例的接入也为我国电网带来了以下方面的问题:

1)分布式光伏高比例接入地区的配电网电压分布不合理。随着部分地区分布式光伏并网容量的快速增长,大量负荷就地平衡,大大减少了电网对分布式光伏并网点的功率输送,甚至还在某些时段出现分布式光伏功率倒送主网。虽然我国公布的《分布式电源并网技术要求》(GB/T 33593—2017)[38]规定了分布式电源的功率因数范围以及在其无功输出范围内应具备根据并网点电压水平调节无功输出、参与电压调节的能力,但并未在并网电压偏差方面对分布式电源有区别于普通负载的特殊规定,仅要求满足正常供电电压标准,即接入20 kV及以下电压等级的分布式电源电压偏差不超过标称电压的±7%。目前,分布式光伏电站采用"就地控制"方式(定功率因数、定电压和定无功),还不能感知周边电网的状态,不能像输电网那样根据负荷和分布式光伏出力的波动进行主动有效的无功电压控制,分布式光伏并网点电压出现抬升,地处配电线路末端且采用恒功率因数运行的光伏电站和分布式光伏并网集中的地区,其并网点电压提升尤为明显。而德国《中、低压配电网并网技术标准》[25,27]对分布式电源有区别于普通负载的特别规定,即分布式电源接入后电压幅值变化不能超过接入前的2%~3%。并且,德国在《可再生能源法》[16-20]中就规定了分布式电源要具备参与无功电压调节的能力,甚至量化规定了在分布式光伏倒送严重、系统出现过载时,电网可以远程控制削减分布式光伏发电量。随后,在具体的《中、低压配电网并网技术标准》中,德国按照分布式电源容量不同细化了不同的无功可调节区域,这使德国配网运行商可以在法律框架中远程调节分布式光伏电站的有功和无功,大大缓解了高比例接入分布式光伏集中倒送带来的电压调节压力。

2)部分分布式光伏低频保护不能适应电网有功频率紧急控制的要求。根据《分布式电源并网技术要求》(GB/T 33593—2017)规定[38],通过380 V电压等级以及通过10(6) kV电压等级接入用户侧的分布式电源,当并网点频率超过运行范围(49.5~50.2 Hz)时,应在0.2 s内停止向电网供电。该标准中分布式电源的低频保护触发值(49.5 Hz)与我国某些区域电网(如华东电网)低频减载保护触发值(49 Hz)不匹配,会导致电网遇大功率缺额扰动时,通过380 V电压等级以及通过10(6) kV电压等级接入用户侧的分布式光伏在低频减载启动前脱网,加剧电网的有功不平衡,类似于英国伦敦"8·9"大停电事故那样使系统频率恢复条件恶化,甚至于意外启动电网的低频减载,造成停电事故,大面积影响社会生活。

3)分布式光伏防孤岛保护的潜在问题。我国《分布式电源并网技术要求》[38]中仅规定分布式电源应具备快速监测孤岛且立即断开与电网连接的能力,未具体指明防孤岛保护的类型。据调研,我国主流逆变器生产厂家均采用主动式的防孤岛保护。与欧洲采用的相位偏移、频率变化率等被动式防孤岛保护不同,主动式防孤岛保护在失去主网电源的孤岛状态下,即使其内部能量能够平衡也能检出孤岛状态,从而解除与主网的联系,提高了防孤岛保护的可靠性。但各种主动式的防孤岛保护是否会像英国伦敦"8·9"大停电事

故中的相移式防孤岛保护那样在电网短路故障期间,频率变化率防孤岛保护在故障切除后的暂态过程中不当启动,还需研究关注。在没有确切结论之前需考虑分布式光伏意外脱网校核同步电力系统惯性和增加电网事故旋转备用比例。

4)用户侧分布式(自发自用余电上网)光伏业主利益与电网运行存在矛盾。这主要表现在两个方面。一方面,用户侧分布式光伏的大力推进,推动了分布式光伏产业的跨越发展,但很多这类分布式光伏业主的收入与预期有较大差别。因为分布式光伏接入会减少电网对用户计量关口的有功馈入,如果用户没有因此调整无功功率补偿方案,其计量关口的功率因数将降低。根据我国《功率因数调整电费办法》[39],该用户可能会因为计量关口的功率因数不达标而被收取额外的惩罚性电费,致使用户"省电不省钱"。如果用户按计量关口功率因数来配置无功补偿装置并进行无功控制,当这个用户有余电上网且余电相对较大时,又会导致分布式光伏并网点的电压抬升,甚至出现越限的现象。从配网运行的角度出发,无功流向与有功流向相反有利于取得比较合理的馈线电压分布。因此当用户有余电上网时,希望用户能够吸收一定量的无功以抑制馈线电压升高,但这却有可能会导致其计量关口的功率因数偏低,如果仍然用此时的关口无功来计算月度功率因数,就将影响到该用户需缴纳的惩罚性电费[40]。另一方面,光伏扶贫中发现,光伏接入率高的村镇台区由于其三相光伏容量接入的不平衡,使得光伏出力较高时的网损通常高于光伏出力较小时的网损,这增加了电网配电损耗,增加了电网运营成本。三相功率不平衡和较低的功率因数都可能导致网损增加。

3.3　应对分布式光伏高比例接入的相关建议

1)对高比例光伏配网中的调压问题进行比较系统的技术经济研究,借鉴国外经验,寻找技术上、经济上都可行的配网调压解决方案。目前的智能电表已经可以读取接入点电压、电流及其与之相关的所有电气量,如有功、无功及其方向等,妥善收集、存储、使用这些数据,就可以为系统解决调压问题提供数据基础。

2)随着储能和微网成本降低,在光伏中配套储能或将光伏集成入微电网。通过储能或微电网技术可以灵活调节光伏业主关口功率,减少馈线上的功率波动,甚至给电网提供调频服务和紧急功率支援等电网运行必需的辅助服务,从而有利于在光伏高比例接入下维持电网稳定性,提高整个电网的光伏渗透率。

3)对自发自用的分布式光伏业主,在有余电上网时的无功功率不计入功率因数考核。

4)完善分布式电源入网相关标准:电压方面,建立区别于一般供电电压标准的分布式光伏并网电压标准;涉网保护方面,分布式光伏低频脱网整定值应与我国电网低频减载保护定值相配合。

5)加强分布式电源接入管理,特别是分布式电源防孤岛保护的设置和实际性能管理。对用户侧的分布式光伏的涉网保护进行统一管理。主动式防孤岛保护是否会像设置不合理的被动式防孤岛保护那样在系统扰动时误判孤岛状态(不是孤岛而判为孤岛),需进一步调研。同时也需加强对入网分布式电源的防孤岛保护测试,既要能判断出孤岛,又要避免在系统故障及其恢复期间的暂态过程中误判。如果存在误判可能,电网运行校核考虑最大扰动时就需将可能的误判量一并考虑在内。

6)注意村镇台区单相接入的分布式光伏的三相均衡接入,以降低台区运行网损。

4　结论

1)德国分布式光伏快速稳定发展得益于根据不同发展阶段的需要不断修订的诸多具体且极具可操作性的能源法案的引领和支撑,还有与之相适应的分布式光伏并网标准在智能测量系统装设、分布式光伏参与无功电压调节、紧急控制和分布式光伏防孤岛保护等方面提供的保障。

2)英国"8·9"事故中所有继电保护和自动装置都正常动作,但由于部分分布式光伏防孤岛保护不当启动而脱网,对整个事故的发展起到了推波助澜的作用。如果该部分分布式光伏未脱网,可能不会发生该次大停电事故。

3)我国公布的一系列能源政策为可再生能源在电网调度中的优先级、电价补贴、全额保障性收购和市场最低消纳指标等方面提供有力支撑,且随着相关政策的修订,其可操作性逐渐改善。

4)在我国能源政策的大力支持下,分布式光伏的发展进入了新时期,但其局部地区高比例接入的特点对我国电网在各方面都产生了一定的影响。如:配网电压分布不合理及无功电压控制

困难；分布式光伏低频保护与电网有功频率紧急控制不配合；防孤岛保护实际性能不确定；用户侧分布式光伏业主利益与电网运行有待协调等。

5）为降低分布式光伏对我国部分电网的影响及增加其接入水平，建议全面系统研究配电网中的调压问题，借鉴国外经验寻找可行的配网调压解决方案；利用储能和微电网的技术提高光伏渗透率；完善分布式电源并网相关标准；调整分布式光伏业主在有余电上网情况下的功率因数考核条件；加强分布式电源接入管理，特别是分布式电源防孤岛保护的设置和实际性能管理；注意村镇台区分布式光伏单相接入时的三相平衡度。

参考文献

[1] Qazi Atika, Hussain Fayaz, Hardaker Glenn, *et al.* Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions [J]. IEEE Access, 2019, 7(3): 63837-63851.

[2] Momete D C. Analysis of the potential of clean energy deployment in the European Union [J]. IEEE Access, 2018, 6(4): 54811-54822.

[3] 白建华，辛颂旭，刘俊，等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(14)：3699-3705.
Bai Jianhua, Xin Songxu, Liu Jun, *et al.* Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3699-3705.

[4] 朱彤. 我国可再生能源的发展阶段与面临挑战[J]. 中国国情国力，2019(7)：8-12.
Zhu Tong. China's renewable energy development stages and challenges [J]. China National Conditions and Strength, 2019(7): 8-12.

[5] 赵波，肖传亮，徐琛，等. 基于渗透率的区域配电网分布式光伏并网消纳能力分析[J]. 电力系统自动化，2017，31(21)：105-111.
Zhao Bo, Xiao Chuanliang, Xu Chen, *et al.* Penetration based accommodation capacity analysis on distributed photovoltaic connection in regional distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 31(21): 105-111.

[6] 吴斌，单来支，王庆，等. 基于三相不平衡的分布式光伏接入配电网的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(24)：108-114.
Wu Bin, Shan Laizhi, Wang Qing, *et al.* Research on optimal configuration of distributed photovoltaic access distribution network based on three-phase unbalance [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 108-114.

[7] 胡雪凯，张乾，胡文平，等. 分布式光伏对线路自动重合闸的影响分析[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(17)：75-82.
Hu Xuekai, Zhang Qian, Hu Wenping, *et al.* Analysis of the influence of distributed photovoltaic on automatic reclosing [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 75-82.

[8] 黄伟，高怡芳，张勇军，等. 计及不确定性的分布式光伏接入配电网极限容量评估[J]. 电力系统保护与控制，2018，46(14)：9-16.
Huang Wei, Gao Yifang, Zhang Yongjun, *et al.* Evaluation of ultimate capacity for distributed photovoltaic access distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 9-16.

[9] He Jinghan, Liu Lin, Ding Fanfan, *et al.* A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 416-425.

[10] Fraunhofer ISE. Photovoltaics report [EB/OL]. (2020-04-23) [2020-06-21]. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf.

[11] Fraunhofer ISE. Recent facts about photovoltaics in Germany [EB/OL]. (2018-10-25) [2020-06-23]. https://helapco.gr/pdf/recent-facts-about-photovoltaics-in-germany_3Jan2018.pdf.

[12] National Grid ESO. Appendices to the technical report on the events of 9 August 2019[EB/OL]. (2019-09-06)[2020-06-23]. https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_appendices_-_final.pdf.

[13] 孙华东，许涛，郭强，等. 英国"8·9"大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报，2019，39(21)：6183-6192.
Sun Huadong, Xu Tao, Guo Qiang, *et al.* Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.

[14] 方勇杰. 英国"8·9"停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化，2019，43(24)：1-7.
Fang Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-7.

[15] Bundesnetzagentur. Jahresbericht 2016[EB/OL]. (2017-07-03) [2020-06-25]. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/JB2016.pdf.

[16] 盛春红. 能源转型的制度创新—德国经验与启示[J]. 科技管理研究，2019，39(18)：25-31.
Sheng Chunhong. Institutional innovation of energy transformation:German experience and enlightenment for China [J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(18): 25-31.

[17] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Renewable energy sources act [EB/OL]. (2000-03-17) [2020-06-27]. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/resact.pdf.

[18] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Renewable energy sources act 2004[EB/OL]. (2004-07-02) [2020-06-27]. http://www.windworks.org/cms/uploads/media/EEG-New-English-final.pdf.

[19] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and

Nuclear Safety. Renewable energy sources act 2009[EB/OL]. (2009-10-25)[2020-06-30]. https://www.clearingstelle-eegk-wkg.de/sites/default/files/EEG_2009_juris_Stand_110721.pdf.

[20] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Renewable energy sources act 2014[EB/OL]. (2014-06-27)[2020-07-01]. https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Downloads/renewableenergy-sources-act-eeg-2014.pdf.

[21] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Renewable energy sources act 2017[EB/OL]. (2016-07-28)[2020-07-01]. https://www.clearingstelle-eegk-wkg.de/sites/default/files/2020-05/EEG_2017_200525.pdf.

[22] 周鹿鸣，杨建华，王维洲，等. 德国《可再生能源法(2017年)》的启示 [J]. 科技导报，2019，37(21)：7-13.
Zhou Luming, Yang Jianhua, Wang Weizhou, *et al*. Analysison German renewable energy sources act 2017[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(21): 7-13.

[23] Bundesnetzagentur. Energiewirtschaftsgesetz-EnWG[EB/OL]. (2005-07-07)[2020-07-03]. https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/EnWG.pdf.

[24] Bundesnetzagentur. Messstellenbetriebsgesetz-MsbG [EB/OL]. (2016-08-29)[2020-07-05]. https://www.gesetze-im-internet.de/messbg/MsbG.pdf.

[25] VDE. VDE-AR-N 4110[EB/OL]. (2018-11) [2020-07-07]. https://www.vde-verlag.de/standards/0100495/vde-ar-n-4110-anwendungsregel-2018-11.html.

[26] 黄庆礼，唐红，蒋春旭，等. 德国光伏中压并网标准述评[J]. 电源技术，2017，41(1)：169-172.
Huang Qingli, Tang Hong, Jiang Chunxu, *et al*. Introduction and analysis on photovoltaic medium-voltage grid-connectionstandard in Germany[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(1): 169-172.

[27] VDE. VDE-AR-N 4105[EB/OL]. https://www.vde-verlagde/standards/0100492/vde-ar-n-4105-anwendungsregel-2018-11.html, 2018-11/2020-07-07.

[28] 林海雪. 分布式电源的并网标准及其发展趋势[J]. 电器与能效管理技术，2016(17)：1-6.
Lin Haixue. On the standard for grid-connected of distributed resources and its developmental trend [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(17): 1-6.

[29] 鲍薇，胡学浩，何国庆，等. 分布式电源并网标准研究[J]. 电网技术，2012，36(11)：46-52.
Bao Wei, Hu Xuehao, He Guoqing, *et al*. Study on standard for grid-integration of distributed resources [J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 46-52.

[30] 徐莉娜，曹炜，侯亚文，等. 基于并网逆变器的无功协调控制研究[J]. 电网与清洁能源，2017，33(5)：92-103.
Xu Lina, Cao Wei, Hou Yawen, *et al*. Coordinated control of var compensation based on grid-connected converter [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 92-103.

[31] National Grid Electricity Transmission plc. The grid code [EB/OL]. (2017-03-21)[2020-07-10]. https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/8589935310Complete%20Grid%20Code.pdf.

[32] National Grid Electricity Transmission plc. National electricity transmission system security and quality of supply standard [EB/OL]. (2017-02-08) [2020-07-11]. https://www.nationalgrid.com/sites/default/files/documents/NETS%20SQSS%20V2.3.pdf.

[33] 国家发展改革委员会. 中国可再生能源法(2009修订案)[R]. 北京：国家发改委，2009：1-10.
National Development and Reform Commission. Renewable energy law of People's Republic of China (2009 amendment) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2009, 1-10.

[34] 国家发展改革委员会. 中国可再生能源法(征求意见稿)[R]. 北京：国家发改委，2020：1-33.
National Development and Reform Commission. Renewable energy law of People's Republic of China (draft for comments) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2020: 1-33.

[35] Liu Dunnan, Liu Mingguang, Xu Erfeng, *et al*. Comprehensive effectiveness assessment of renewable energy generation policy: a partial equilibrium analysis in China[J]. Energy Policy, 2018, 115(1):330-341.

[36] Liu Junxia. China's renewable energy law and policy: A critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 99(7499):212-219.

[37] 国家发展改革委员会. 可再生能源发电全额保障性收购管理办法[R]. 北京：国家发改委，2016：1-8.
National Development and Reform Commission. The administration of the guaranteed buyout of electricity generated by renewable energy resources[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2016: 1-8.

[38] He Guoqing, Liu Chun, Zhang Jitong, *et al*. Interpretation of GB/T 33593—2017, technical requirements for grids connection of distributed resources [J]. China Standardization, 2018(1): 78-83.

[39] 水利电力部，国家物价局. 功率因数调整电费办法[R]. 北京：水利电力部，国家物价局，1983：1-7.
Ministry of Water Resources and Electric Power, National Price Bureau. Power factor adjustment method[R]. Beijing: Ministry of Water Resources and Electric Power, National Price Bureau, 1983: 1-7.

[40] 张文青，徐莉娜，曹炜，等. 分布式电源对馈线电压偏差与用户功率因数的影响[J]. 上海电力学院学报，2017，33(6)：521-526，539.
Zhang Wenqing, Xu Lina, Cao Wei, *et al*. Study of the effects of distributed generation on feeder voltage regulation and user power factor [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2017, 33(6): 521-526, 539.

收稿日期：2020-09-21
修改稿日期：2020-09-27