

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.026

分布式发电技术及其并网运行研究综述

余 昆^{1,2},曹一家¹,倪以信³,陈星莺²,郭创新¹

(1.浙江大学电气工程学院,浙江 杭州 310027;2.河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098;
3.清华大学电机系,北京 100084)

摘要:在介绍分布式发电技术相关进展情况的基础上,重点分析讨论了分布式发电并网运行必须解决的关键问题和目前的研究情况.分布式发电并网运行会影响地区电网的安全稳定运行,需要研究相应的稳态和动态分析与控制方法、继电保护的配置和配合策略、动态电能质量控制方法.为了能够充分利用分布式发电的优点,避免其不利影响,还需要对分布式电源及其相关的无功电源进行规划,并建立良好的配电市场.这些研究还不成熟,需要进一步深入研究,尤其需要对相关的继电保护、地区电网孤岛运行和分布式电源的规划进行重点研究.

关键词:分布式发电 地区电网 并网运行 运行与规划 继电保护 配电市场

中图分类号:TM61 ;TM727 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2009)06-0741-08

近年来分布式发电技术发展迅速,但未形成系统理论,也没有统一的定义和术语,除分布式发电外,北美惯用分散式发电,南美常用嵌入式发电,欧洲和亚洲部分地区则常用非集中式发电^[1].这些发电形式实质都是小电源分散发电,随着电力系统的诞生而存在,但因交流高压远距离输电技术的发展及电网规模不断扩大,主要的电力供应由大型发电厂集中供给,其作用便被忽视.然而,电力系统发展至今,集中发电、远距离输电和大电网互联的弊端开始显现^[2],并且常规发电成本增加,环境保护意识增强,因此小型分散电源发电尤其是可再生的一次能源发电又开始受到重视.为叙述方便,本文定义:任一电源,如果因为其容量或发电目的的原因而被接入地区电网的某一电压等级,则该电源称为分布式电源,采用分布式电源发电的形式称为分布式发电.例如,当 220 kV 及以上电压等级作为输电网,110 kV 和 35 kV 作为地区供电网,10 kV 作为配电网时,接入 10 ~ 110 kV 电网中的任一电源都属于本文定义的分布式电源.

分布式发电包括小型水力发电、新型可再生能源(风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能)发电、不可再生能源发电(微型燃气轮机发电,燃料电池发电,垃圾发电,冷、热、电联产等)和储能电源发电.分布式电源具有以下特点:(a)容量范围广,但相对较小,安装和运营灵活^[3];(b)分布广,遍布地区电网的各个电压等级,一次能源形式与并网方式多样;(c)部分分布式电源具有较大的随机性和波动性,容易受天气等自然因素的影响^[2,4-7];(d)小型的分布式电源监视控制能力弱^[7].

为了合理利用分布式发电技术,充分发挥其优点,避免产生负面影响,要求分布式电源的安装位置和容量大小要恰当,运行可靠,并且具有一定的控制手段和控制策略,与保护系统协调.本文首先介绍各种分布式发电技术的最新进展,然后详细探讨分布式发电并网运行需要解决的一系列关键问题.

1 分布式发电技术

1.1 可再生能源发电技术

小型水力发电的容量为 10 kW ~ 100 MW,多数为库容小或无库容的径流式电站,不具有调节能力,且通信联系薄弱,监测难度大,调度命令难以及时到达,因此,目前小型水力发电处于无序状态^[7].而小型水力发电技术仍在继续发展,如小型水电站变速发电技术具有明显优于传统同步发电机的性能,可提高水轮机效

收稿日期:2008-10-06

基金项目:国家自然科学基金(50677062) 教育部博士点基金(20060294019) 新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0745) 浙江省自然科学基金(R107062)

作者简介:余昆(1978—),男,重庆人,讲师,博士研究生,主要从事地区电力经济运行、地区电网安全分析与控制研究.

率,减少气蚀、磨蚀和振动,并能明显提高电力系统的静态和暂态稳定性,具有广阔的应用前景^[8]。

风力发电技术的成熟度仅次于小型水力发电,其工程造价(8000~9000元/kW)已经低于核电,平均电价可达到0.56元/(kW·h)(火电为0.36元/(kW·h))^[4],能适应商业化规模生产。直驱式同步发电机单机容量可达2MW,其应用将促进风力发电技术的推广。

太阳能光伏电池发电技术已经成熟,虽然单电池板的功率小,但整个太阳能电站的容量可以达到百兆。由于其设备造价和发电成本高,目前不具备大规模应用的条件,就我国来说,完全商业化运作的并网光伏发电上网电价(4元/(kW·h),西方国家为1元/(kW·h))是常规能源发电的10倍多,设备造价(5万元/kW)相当于火电的10倍^[4]。我国研究的非晶硅太阳能薄膜电池技术有望在2年内将电价降为1元/(kW·h)。太阳能热发电技术也取得了巨大进步,我国首座太阳能热发电系统(70kW)于2007年6月在南京建成投运,现已开始研究光伏和光热综合发电,有望将太阳能发电成本控制在0.6元/(kW·h)以内。

以高效直燃发电为代表的生物质能发电技术在国外已经成熟,实现了规模化产业经营,单机容量可达100MW,产生的灰渣将全部综合利用,且各项排放指标能满足环保要求。与同功率燃煤机组相比,一台25MW燃烧秸秆的机组每年可减排10万tCO₂。

除潮汐发电外,近年来涌现出一些新式的海洋能发电技术。葡萄牙建成了750kW的海浪发电系统,日本有1500多座波浪发电装置在发电,英国建成了1座20MW的固定式波力电站,美国先后建成了50kW和1MW的海水温差电站,利用表面海水和深层海水的温差发电。世界首台海洋流发电机组(130kW)在意大利南部建成。目前,这些发电技术还不成熟,但海洋中蕴藏着巨大能量,当突破一个个技术难题后,将可能成为理想的发电技术。

地热发电技术非常成熟,已实现商业化运行,其出力非常稳定,单机容量在兆瓦级。其主要技术问题如汽-水两相流介质的输送问题、流动稳定性问题、压力损失问题和结垢问题都已经解决,正朝着开发温度高、热能潜力大、流体质量好的深部热储发展,建设既经济又环保的新型地热发电站^[9]。

1.2 不可再生能源发电技术

微型燃气轮机(30~300kW)以天然气、甲烷、汽油、柴油为燃料,建造成本和运行成本很低,其发电成本是居民电价的一半,可在2年内收回初期投资成本^[2,4,10]。微型燃气轮机采用简单循环时效率很难超过20%,而带回热器后可接近30%,如果进行热电联产则可提高到75%^[11],因此微型燃气轮机发电具有很强的竞争力。

目前已研制成功多种燃料电池,其中磷酸型燃料电池技术最成熟,且已经商业化。燃料电池发电效率与规模基本无关,小型设备也能得到高效率,如果进行热电联产,其发电效率可达80%,并且它跟随负荷变化的能力非常强,可在1s内跟随50%的负荷变化^[4,12],因此应用前景十分广阔。

垃圾热解气化焚烧炉技术通过控制2个燃烧室的供风量和温度实现垃圾热解气化和完全燃烧,然后高温烟气经余热锅炉产生高温过热蒸汽发电,可大大减少垃圾焚烧带来的环境污染,促进垃圾发电技术的推广应用^[13]。实践证明,采用该技术焚烧后的产渣量为垃圾的20%,进一步将金属和玻璃分检回收后,余渣可全部制成市政用砖,只有少量飞灰需单独固化填埋,其量不足垃圾处理量的1%^[13]。由于垃圾焚烧发电要求进炉垃圾平均低位热值在5000kJ/kg以上,而我国城市垃圾未经过分拣,成分复杂,含水量高,热值低,不能满足这一要求,所以只在一些大都市和沿海经济发达的城市建有垃圾焚烧处理厂,其单机容量可达25MW。

地区电网中的发电厂除了发电以外,还需要承担供热、制冷的任务,因此一些分布式电源需要采用冷、热、电联产(combined cooling heating and power, CCHP)的形式。冷、热、电联产技术可提高能源的利用效率(高达90%),降低用户的能源支付,为用户提供不同的能源需求。冷、热、电联产系统的规模一般较小,容量从几百千瓦到几十兆瓦^[10],目前主要用燃气轮机、微型燃气轮机或燃料电池发电来实现。

1.3 储能技术

由于超导储能的成本高,系统为维持液化冷却剂的低温而变得非常复杂,且需定期维护,所以一直未能实用化。高温超导材料的出现和可用于工频交流的低温超导材料的成功开发为超导储能带来了新的希望,只要继续降低成本,提高稳定性,在开发高温超导材料和研究控制策略及失超保护技术方面取得突破,就可能将超导储能技术商业化^[14]。

超级电容器通过使用多孔电解质加大两极板的面积来提高储能能力,其存储容量可达普通电容器的

20 ~ 1 000 倍^[14-16]。由于功率密度大,充电能量密度高,可快速充放电,使用寿命长,不易老化,没有可动部分,并且既不需要冷却装置也不需要加热装置,正常工作时内部没有任何化学变化^[14],所以应用前景非常广阔,目前已经实现了商业化规模应用。

飞轮储能是一种新型的机械储能方式,随着高强度纤维材料、低损耗轴承、电力电子技术的发展,飞轮储能系统已经开始转向实用化^[14]。

2 分布式发电并网运行的关键问题

在第1节介绍的分布式发电技术中,除大型风电场和潮汐电站直接并入主电网运行外,都直接与地区电网相连,属于本文定义的分布式发电,换句话说,地区电网包含各种分布式发电技术。由于这些发电技术性能各异、容量范围广、并网点多、并网方式多样,因此要保证电网的稳定、安全、可靠、经济运行,有一系列问题亟待解决,下面仅对其中的关键问题进行讨论。

2.1 地区电网的稳态运行分析与控制

分布式发电并网后,地区电网的结构和运行方式发生了根本性变化,形成多个有限容量电源与无穷大电源并网供电的模式。由于各电源的出力曲线各不相同,且一些电源具有很大的随机性和波动性,导致潮流的方向变化不定,同时各种电源的控制特性也不尽相同,所以需寻求新的地区电网分析与控制方法。

a. 电源的输出特性与控制方式对潮流计算的方法和收敛特性有很大影响,需要研究合适的节点类型和收敛性好的潮流计算方法^[17-18];风力发电、太阳能发电、以径流为主的小型水力发电等电源出力具有随机性,确定性潮流不能描述电网的特征,必须建立各种分布式电源和负荷的概率模型,研究地区电网潮流的概率特性和概率潮流计算方法。

b. 大量分布式电源接入电网后会造成电压波动增大和无功潮流不合理,现有电压/无功控制手段不能满足要求。电力电子技术的发展促进了 SVC, STATCOM, SSSC 等控制器的应用,如何综合运用这些控制器协调地区电网各电压等级的无功电压分布需要进行研究,并针对分布式电源的随机动态特性和分相、三相混合控制模式,建立地区电网的无功优化和电压控制模型与分析方法。目前的研究只针对配电网中分布式电源的作用,并集中在 AVR, SVR 与分布式电源的协调控制^[5,19-22]方面。

c. 恰当的控制能使分布式电源以孤岛形式稳定运行^[23-25],但必须进行合理的供电范围划分^[26],这样可将分布式电源作为用户不中断供电的备用电源而发挥作用^[27-29],提高供电可靠性。然而分布式电源以孤岛运行会产生不同步和频率偏离问题,重新联网时需要进行同步控制。

d. 分布式发电并网后地区电网具备了潮流优化的条件,通过合理安排分布式电源出力,可以充分利用可再生能源,降低其他能源消耗或发电成本,减少损耗,这些优化目标之间需要协调。分布式发电的随机出力能在多大程度上满足负荷的需要,与常规的可控电能之间如何协调发展,需要寻找出力与负荷这两组不相关的随机变量之间的平衡条件,动态调度各电源的出力,实现经济调度和潮流的优化。目前,仅文献^[30]讨论了含有风电场的优化潮流问题,提出了一种多阶段的动态优化潮流模型。

2.2 地区电网的动态运行分析与控制

分布式发电并网运行给地区电网的运行带来了许多不稳定因素,必须进行深入研究,寻找合理的控制方法。

a. 由于分布式发电并网运行增加了地区电网中感应电机的数量,同时电动机负荷增多,尤其空调负荷剧增,使得地区电网发生故障后可能会失去电压稳定,在保护和控制在不完善时更容易发生,1997 年巴西已经出现配电网电压不稳定现象^[31]。目前关于这方面的研究仅限于异步发电机对配电网小扰动电压稳定性的影响^[32-33]。

b. 地区电网的阻尼相对较大,一般不会出现功角稳定问题,但分布式电源的控制能力弱,励磁控制范围小,易达到控制极限,此时相当于恒定励磁系统,如果在峰荷期间电网承受较大的负荷,可能会因为小的扰动而引起分布式电源失去功角稳定^[34]。另外,为充分利用可再生能源和解决因负荷增加迅速和峰谷差大时集中发电表现出的不足,分布式电源很多时候接近满负荷运行,若此时电网中发生故障,则分布式电源可能会失去稳定^[35]。并且,仅由分布式电源供电的孤岛系统,因其出力和负荷具有随机性,这两组不相关的随机系统很可能出现不平衡而引起地区电网的频率不稳定。文献^[36]研究了交流电机(感应电机和同步电机)和

DSTATCOM 装置对配电网动态行为的影响,分析了 DSTATCOM 作为电压控制器或功率因数控制器对配电网稳定的影响.文献[37]对分布式电源进行负载跟随研究,指出容量小于 1 MW 的发电机惯性及阻尼小,通过控制其输出可有效跟随负载的变化.

c. 由于地区电网的主电源是大电网,故障时如果分布式电源储备不足,经过网络重构也不能获得高质量的电力,或者电源的分布不合理时,地区电网的安全可靠供电将受到影响,因此需要进行静态安全分析.由于一些分布式电源出力具有随机性,且地区电网的静态安全分析涉及网络重构,因此它远比输电网的静态安全分析复杂.文献[38]提供了一种概率安全评估方法分析大量分布式电源被切除时的状态,并提出优化控制方法提高系统稳定性.

2.3 地区电网的继电保护配置与配合

分布式发电并网后,地区电网成为多电源结构,致使潮流方向频繁变化,原有继电保护配置与配合、保护方式不能适应这种变化,必须研究新的继电保护装置或其他措施(如电抗器限流^[39])与原有网络配合,协调各种继电保护和控制装置的行为^[40],实现电网运行方式变化后继电保护再整定^[41].由于分布式发电对继电保护的影响与分布式电源的容量大小、类型和位置都有关,因此,需要综合考虑保护的配置与分布式电源的规划.

2.4 地区电网的动态电能质量控制

分布式电源并网运行及电力电子设备用于控制系统后带来诸如电压脉冲、涌流、电压跌落和瞬时供电中断等动态电能质量问题^[42].目前,国内外的研究主要集中在对这些问题的检测、评价以及产生源的分析^[15,42-45],很少提出合理的控制措施,但这些却是分布式发电并网运行必须解决的问题.文献[46]建议感应电机降压启动,与功率相匹配来消除电压闪变,同步电机需加快与电压同步,变换器通过控制注入电流改变输出.

2.5 分布式电源的规划

如前所述,分布式发电类型与规模多种多样,各自有着不同的运行特性,对电网的影响也各不相同,因此必须对分布式电源进行优化规划,在适当的地方安装恰当类型的分布式电源,使电网的综合性能达到最优.目前的研究主要集中在分布式发电对电网影响的分析和分布式电源位置及容量的规划等方面^[47-50].由于分布式电源的随机性和多样性,进行规划时要求分布式电源的单机容量和总并网容量不能超过电网的承载能力^[51-52],且需考虑各种电源的不同特点和实际环境条件的约束,对多种电源进行协调规划.因此,确定地区电网对各种分布式电源的承载能力,研究多种电源并存时的变化规律,将是分布式电源优化规划的关键.另外,由于可以应用的分布式电源数量庞大,且容量小,若对每一个分布式电源都进行严格的规划需要大量投资,可能入不敷出.但是分布式电源的容量、特征、用途具有相似性,因此可进行集中研究,形成分布式电源的规划导则^[46].

2.6 无功电源的规划

分布式发电并网后异步发电机吸收无功,其他电源发出无功,地区电网中电压、无功的分布变得复杂多变,因此传统的通过电容器和 SVR 进行电压、无功控制的方式已经不能满足要求,需要研究新的控制装置,如 SVC, STATCOM, SSSC, VSC-HVDC 等.由于这些控制装置的功能不尽相同,性能和成本差异较大,对某一地区电网如何选择必须根据具体情况进行分析,并且要协调这些控制装置在优化无功、调节电压、提高电压稳定性方面的作用.文献[6]提出一种考虑各种负荷水平和分布式电源功率输出条件下对具有 LDC 功能的变压器和 SVR 参数进行优化设置的方法.文献[53]则用 TCSC 和 SVC 配合进行调节,有效地提高了供电点的电压质量.

2.7 配电市场

各种分布式电源成本不同,品质各异,并网后将对地区电网的运营产生很大的冲击,会影响整个电力经济和地区电力交易方式,电价和市场服务都必须进行相应的调整才能促进分布式发电技术的应用,适应地区电网的发展.

a. 要为供电商和用户分摊损耗,采用具有明确意义的损耗分摊技术建立合适的经济奖惩制度,且分摊系数要能体现电源的大小、位置和接入系统的时间^[54-57].

b. 分布式发电能延缓电厂建设和电网的扩建计划,减少末端用户的电力支付^[58]和环境污染,并且利用

可再生能源进行发电还具有可持续发展的优点.但由于目前分布式发电的成本高,并网运行还会给电网带来负面影响,因此配电市场需要制定合理的电价,既鼓励发展分布式发电技术,尤其是利用绿色能源,也不损害配电公司的利益,实现地区电网的和谐发展.文献[59]建议将节点电价用于配电网.文献[60]指出在解除管制的区域利用分布式电源进行孤岛供电将对电力的市场价格产生影响,并在优化潮流计算中计及该影响.

另外,可以利用分布式发电技术进行电力备用、调峰、无功和电压支持服务,也可作为应急备用电力,这样能更好地发挥其作用,但需要形成合理的辅助服务市场.文献[61]指出,若高峰时段分布式发电的运行成本比系统低,则分布式电源满发可减少整个系统的成本.而考虑客户中断成本时,将分布式电源作为备用比削峰更好.文献[62]提出安装分布式电源作为紧急情况 and 尖峰负荷的备用容量.文献[63]采用多代理技术设计了不间断电力变电站的功率协调控制系统,用氢储能-燃料电池系统进行长期储能,用超导储能进行短期储能.

3 结 论

分布式发电能利用可再生能源,减少环境污染,弥补集中发电和远距离输电的不足,为边远地区提供电力及实现冷、热、电联产,这是电力系统的发展方向.目前,一些分布式发电技术已经发展成熟,并实现了商业化规模生产.随着分布式发电的迅速发展,越来越多容量较大的分布式电源并网运行,分布式电源在地区电网中的渗透程度越来越高,它们在对电力系统做出贡献的同时也带来了一定的负面影响.为了充分发挥分布式电源的优势,避免不利影响,需要对有关分布式发电的技术和分布式发电的并网运行进行系统而深入的研究,构建协同、稳定的地区电网.其中,地区电网继电保护的配置与配合、地区电网及其孤岛运行时的分析和控制、分布式电源的规划等问题涉及地区电网的安全稳定运行,是保证分布式发电技术广泛应用并充分发挥其作用的关键.

参考文献:

- [1] ACKERMANN T, ANDERSSON G, SODER L. Distributed generation: a definition[J]. Electric Power Systems Research, 2001, 57(6): 195-204.
- [2] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75. (LIANG You-wei, HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75, 88. (in Chinese))
- [3] 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 Xing-yuan, QIU Xiao-yan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-97. (in Chinese))
- [4] 张志坚, 王建东, 马进, 等. 分布式发电及其关键技术[J]. 山西电力, 2007(2): 57-61. (ZHANG Zhi-jian, WANG Jian-dong, MA Jin, et al. Key technology of distributed generation[J]. Shanxi Electric Power, 2007(2): 57-61. (in Chinese))
- [5] VILLACCI D, BONTEMPI G, VACCARO A. An adaptive local learning-based methodology for voltage regulation in distribution networks with dispersed generation[J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21(3): 1131-1140.
- [6] OOMORI T, GENJI T, YURA T, et al. Fast optimal setting for voltage control equipment considering interconnection of distributed generators[C]//IEEE/PES. Trans. and Distr. Conference and Exhibition, 6-10 Oct. 2002, Yokohama, Japan. New York: IEEE, 2002: 1145-1150.
- [7] 张世钦, 汪晓岩. 福建中小水电并网管理的探索与实践[J]. 水电自动化与大坝监测, 2005, 29(3): 25-29. (ZHANG Shi-qin, WANG Xiao-yan. Exploration and practice in management of Fujian medium and small hydropower plants connected with the power grid[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2005, 29(3): 25-29. (in Chinese))
- [8] 徐锦才. 小型水电站变速发电技术的研究[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10): 67-69. (XU Jin-cai. Generating technology of velocity-varying system used in small hydropower stations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(10): 67-69. (in Chinese))
- [9] 周大吉. 西藏羊八井地热发电站的运行、问题及对策[J]. 电力建设, 2003, 24(10): 1-9. (ZHOU Da-ji. Operation, problems and countermeasures of Yangbajing geothermal power station in Tibet [J]. Electric Power Construction, 2003, 24(10): 1-9. (in Chinese))
- [10] 孙建国, 冯志兵. 冷热电联产系统的发展及前景[J]. 燃气轮机技术, 2006, 19(2): 11-17. (SUN Jian-guo, FENG Zhi-bing. Development and potential of combined cooling, heating and power system [J]. Gas Turbine Technology, 2006, 19(2): 11-17. (in Chinese))

- [11] 翁一武,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003,36(3):1-4. (WENG Yi-wu, WENG Shi-lie, SU Ming. Distributed power system based on micro gas turbine[J]. Electric Power, 2003, 36(3): 1-4. (in Chinese))
- [12] 郑健超.电力前沿技术的现状和前景[J].中国电力,1999,32(10):9-14. (ZHENG Jian-chao. Current status and prospects of power technologies at the frontier[J]. Electric Power, 1999, 32(10): 9-14. (in Chinese))
- [13] 周北安,许亮,吕红.垃圾焚烧发电技术探讨[J].锅炉制造,2006(3):39-40. (ZHOU Bei-an, XU Liang, LV Hong. The discussion about garbage power technology[J]. Boiler Manufacturing, 2006(3): 39-40. (in Chinese))
- [14] 程华,徐政.分布式发电中的储能技术[J].高压电器,2003,39(3):53-56. (CHENG Hua, XU Zheng. Energy storage for use with distribution power generation[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 53-56. (in Chinese))
- [15] 胡学浩.分布式发电电源技术及其并网问题[J].电工技术杂志,2004(10):1-5. (HU Xue-hao. Distribution generation technology and its issue of integrated operation[J]. Electrotechnical Journal, 2004(10): 1-5. (in Chinese))
- [16] 严俊,赵立飞.储能技术在分布式发电中的应用[J].安徽电力,2006,23(3):55-57. (YAN Jun, ZHAO Li-fei. Application of energy storage technology to distributed generation[J]. Anhui Electric Power, 2006, 23(3): 55-57. (in Chinese))
- [17] NAKA S, GENJI T, FUKUYAMA Y. Practical equipment models for fast distribution power flow considering interconnection of distributed generators[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society Summer Meeting, 15-19 Jul. 2001, Vancouver, British Columbia, Canada. New York: IEEE, 2001: 1007-1012.
- [18] 陈海焱,陈金富,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):35-40. (CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 35-40. (in Chinese))
- [19] KUBOTA Y, GENJI T, MIYAZATO K, et al. Verification of cooperative control method for voltage control equipment on distribution network simulator considering interconnection of wind power generators[C]//IEEE/PES. Trans. and Distr. Conference and Exhibition, 6-10 Oct. 2002, Yokohama, Japan. New York: IEEE, 2002: 1151-1156.
- [20] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56-60. (WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 56-60. (in Chinese))
- [21] KIPRAKIS A E, WALLACE A R. Maximising energy capture from distributed generators in weak networks[J]. IEE Proc-Gen Trans & Distr, 2004, 151(5): 611-618.
- [22] KOJOVIC L A. Coordination of distributed generation and step voltage regulator operations for improved distribution system voltage regulation[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society General Meeting, 18-22 Jun. 2006, Montreal, Canada. New York: IEEE, 2006: 1611-1618.
- [23] SISHUBA S, REDFERN M A. Adaptive control system for continuity of supply using dispersed generators[J]. IEE Proc-Gen Trans & Distr, 2005, 152(1): 23-30.
- [24] YASUDA K, ISHII T. Analysis and autonomous distributed control of super distributed energy systems[C]//IEEE/PES. Trans. and Distr. Conference and Exhibition, 6-10 Oct. 2002, Yokohama, Japan. New York: IEEE, 2002: 1628-1631.
- [25] LOPES J A P, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for microgrids islanded operation[J]. IEEE Transactions on Power System, 2006, 21(2): 916-924.
- [26] LU Yu-ping, YI Xin, WU Ji-an, et al. An intelligent islanding technique considering load balance for distribution system with DGs[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society General Meeting, 18-22 Jun. 2006, Montreal, Canada. New York: IEEE, 2006: 1-5.
- [27] HEGAZY Y G, CHIKHANI A Y. Intention islanding of distributed generation for reliability enhancement [C]//CIGRE & IEEE/PES. Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, 8-10 Oct. 2003, Montreal, Canada. New York: IEEE, 2003: 208-213.
- [28] SECA L, LOPES J A P. Intentional islanding for reliability improvement in distribution networks with high DG penetration[C]//IEEE/PES. Future Power Systems 2005 International Conference on Future Power Systems, 16-18 Nov. 2005, Amsterdam, Netherlands. New York: IEEE, 2005: 1-5.
- [29] KHUSHALANI S, SCHULZ N N. Restoration optimization with distributed generation considering islanding [C]//IEEE/PES. Power Engineering Society General Meeting, 12-16 Jun. 2005, San Francisco, USA. New York: IEEE, 2005: 2445-2449.
- [30] CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Multi-stage dynamic optimal power flow in wind power integrated system[C]//IEEE/PES. Trans. and Distr. Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 23-25 Aug. 2005, Dalian, China. New York: IEEE, 2005: 1-5.
- [31] PRADA R B, SOUZA L J. Voltage stability and thermal limit constraints on the maximum loading of electrical energy distribution feeders [J]. IEE Pro-Gen Trans & Distr, 1998, 145(5): 573-577.
- [32] FREITAS W, DASILVA L C P, MORELATO A. Small-disturbance voltage stability of distribution systems with induction generators[J].

- IEEE Transactions on Power System,2005,20(3) :1653-1654.
- [33] JENKINS N,STRBAC G. Impact of embedded generation on distribution system voltage stability[C]//IEE. IEE Colloquium on Voltage Collapse, Apr. 1997. London : IEE, 1997 :1-4.
- [34] DUDGEON G J W, LEITHEAD W E, O'REILLY J, et al. Prospects for the decentralised control of small-scale power networks with embedded generation[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 Jan. 2000, New York, USA. New York : IEEE, 2000 :1399-1404.
- [35] HSU Cheng-ting, CHEN Chao-shun. Islanding operations for the distribution systems with dispersed generation systems[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society General Meeting, 12-16 Jun. 2005, San Francisco, USA. New York : IEEE, 2005 :2962-2968.
- [36] FREITAS W, MORELATO A, XU Wilsun, et al. Impacts of AC generators and DSTATCOM devices on the dynamic performance of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2) :1493-1501.
- [37] LI S, TOMSOVIC K, HIYAMA T. Load following functions using distributed energy resources[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society Summer Meeting, 16-20 Jun. 2000, Washington, USA. New York : IEEE, 2000 :1756-1761.
- [38] MORI H, SAKATANI Y. Application of probabilistic (N-1) security assessment technique to distribution systems with distributed generation[C]//IEEE/PES. Trans. and Distr. Conference and Exhibition, 6-10 Oct. 2002, Yokohama, Japan. New York : IEEE, 2002 :739-744.
- [39] 王希舟,陈鑫,罗龙,等. 分布式发电与配电网保护协调性研究[J]. 继电器, 2006, 26(3) :15-19. (WANG Xi-zhou, CHEN Xin, LUO Long, et al. Research on the coordination of distributed generation and distribution system protection[J]. Relay, 2006, 26(3) :15-19. (in Chinese))
- [40] GIRGIS A, BRAHMA S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C]//IEC. 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, 11-13 Jul. 2001, Piscataway, USA. Geneve : IEC, 2001 :115-119.
- [41] 周耀烈,李仁飞,苏永智. 分布式发电机组并网 10 kV 开关站的保护新逻辑[J]. 高电压技术, 2005, 32(6) :105-107. (ZHOU Yao-lie, LI Ren-fei, Su Yong-zhi. A new relay protective scheme for distributed generations interconnecting with 10 kV switching station [J]. High Voltage Engineering, 2005, 32(6) :105-107. (in Chinese))
- [42] 李蓓,李兴源. 分布式发电及其对配电网的影响[J]. 国际电力, 2005, 9(3) :45-49. (LI Bei, LI Xing-yuan. Distributed generation sources and their effects on distribution networks[J]. International Electric Power For China, 2005, 9(3) :45-49. (in Chinese))
- [43] SAAD-SAOUD Z, JENKINS N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion. 1999, 14(3) :743-748.
- [44] JENKINS N, STRBAC G. Effects of small embedded generation on power quality[C]//IEE. IEE Colloquium on Issues in Power Quality, 28, Nov. 1995, London, UK. London : IEE, 1995 :1-4.
- [45] 吴汕,梅天华,龚建荣,等. 分布式发电引起的电压波动和闪变[J]. 能源与环境, 2006(4) :54-58. (WU Shan, MEI Tian-hua, GONG Jian-rong, et al. Voltage fluctuation and flicker caused by distributed generation[J]. Energy Engineering, 2006(4) :54-58. (in Chinese))
- [46] BARKER P P, De MELLO R W. Determining the impact of distributed generation on power systems :part 1, radial distribution systems [C]//IEEE/PES. Power Engineering Society Summer Meeting, 16-20 Jun. 2000, Washington, USA. New York : IEEE, 2000 :1645-1656.
- [47] 王成山,陈恺,谢莹华,等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3) :38-43. (WANG Chen-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3) :38-43. (in Chinese))
- [48] CELLI G, GHIANI E, MOCCI S, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for the sizing and sitting of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(15) :750-757.
- [49] KEANE A, O'MALLEY M. Optimal allocation of embedded generation on distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3) :1640-1646.
- [50] FREITAS W, VIEIRA J C M, MORELATO A, et al. Influence of excitation system control modes on the allowable penetration level of distributed synchronous generators[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2005, 20(2) :474-480.
- [51] KIM T E, KIM J E. A method for determining the introduction limit of distributed generation system in distribution system[C]//IEEE/PES. Power Engineering Society Summer Meeting, 15-19 Jul. 2001, Vancouver, Canada. New York : IEEE, 2001 :456-461.
- [52] 王超,何阳,夏翔,等. 分布式电源准入容量对电力系统的影响分析[J]. 华东电力, 2006, 34(4) :1-4. (WANG Chao, HE Yang, XIA Xiang, et al. Analysis of the voltage regulations based the maximum penetration level model of distributed generators[J]. East China Electric Power, 2006, 34(4) :1-4. (in Chinese))
- [53] 彭辉,樊庆玲,刘会金. 配电网中 TCSC 和 SVC 的联合补偿[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4) :16-18. (PENG Hui,

- FAN Qing-ling, LIU Hui-jin. Hybrid compensation of TCSC and SVC in distribution system[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(4): 16-18. (in Chinese))
- [54] CARPANETO E, CHICCO G, AKILMALI J S. Branch current decomposition method for loss allocation in radial distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1170-1179.
- [55] MUTALE J, STRBAC G, CURCIC S, et al. Allocation of losses in distribution systems with embedded generation[J]. IEE Proc-Gen Trans & Distr, 2000, 147(1): 7-14.
- [56] COSTA P M, MATOS M A. Loss allocation in distribution networks with embedded generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 384-389.
- [57] QUEZADA V H M, ABBAD J R, ROMAN T G S. Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 533-540.
- [58] GIL H A, JOOS G. On the Quantification of the network capacity deferral value of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1592-1599.
- [59] SOTKIEWICZ P M, VIGNOLO J M. Nodal pricing for distribution networks efficient pricing for efficiency enhancing DG[J]. IEEE Transactionson Power Systems, 2006, 21(2): 1013-1014.
- [60] ZEINELDIN H H, BHATTACHARYA K, EL-SAADANY E F, et al. Impact of intentional islanding of distributed generation on electricity market prices[J]. IEE Proc-Gen Trans & Distr, 2006, 153(2): 147-154.
- [61] BAE I S, KIM JIN O, KIM J C, et al. Optimal operating strategy for distributed generation considering hourly reliability worth[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 287-292.
- [62] DALEY J M, SICILIANO R L. Application of emergency and standby generation for distributed generation 1. concepts and hypotheses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1214-1225.
- [63] 罗凯明, 李兴源. 基于多代理技术的不间断电力变电站设计方案[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 1-5. (LUO Kai-ming, LI Xing-yuan. Study on multi-agent system based uninterrupted power substation control system[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 1-5. (in Chinese))

Review of research on distributed generation technology and its integrated operation

YU Kun^{1,2}, CAO Yi-jia¹, NI Yi-xin³, CHEN Xing-ying², GUO Chuang-xin¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China ;

2. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : Based on an introduction to relevant advances in distributed generation technology, the key issues and current research status of the integrated operation of distributed generation are analyzed and discussed. The integrated operation of distributed generation influences the safety and steady operation of the district grid. The relevant steady and dynamic analysis and control method, the configuration and strategy of relay protection, and the method of dynamic electricity quality control should be studied. To make the best of its advantages and compensate for its disadvantages, the distributed generation and relevant reactive power source should be programmed, and satisfactory electricity distribution markets should be established. The current research is insufficient and further study is needed, especially on the relevant relay protection, the island operation of the district grid, and the programming of distributed generation.

Key words : distributed generation ; district grid ; integrated operation ; operation and programming ; relay protection ; electricity distribution market