基于配电网接纳能力的分布式电源并网案例库架构设计

洪博文[1],黄碧斌[1],葛磊蛟[2],李琼慧[1],戈 狄[3],何永胜[4]
(1. 国网能源研究院有限公司,北京 102209;
2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072;
3. 国网河南省电力公司许昌供电公司,河南 许昌 461000;4. 国网电网公司有限公司,北京 100031)

摘要:分布式电源的容量大小及接入方式影响配电网的安全稳定运行,尤其是在未来高渗透率分布式电源接入局部配电网时,地市供电公司将面临确定分布式电源并网方案的挑战。分析分布式电源并网运行的制约条件和关键影响因素,从优化分布式电源并网运行方式的角度出发,提出一种基于配电网接纳能力的分布式电源并网案例库架构,以期为开展系统性的案例研究、支撑分布式电源并网方案快速制定和优化提供理论指导。

关键词:配电网;接纳能力;分布式电源;并网案例库
中图分类号:TM 711 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.004

0 引言

分布式电源作为一种分布在用户端的能源综合利用系统,具有能效利用合理、损耗小、污染小、运行灵活、系统经济性好等优点,但同时也对电网产生一定的影响[1-4]。不同的接入方式以及运行方式对电网系统的影响不同,考虑技术、经济等多重因素,选择合理的分布式电源并网运行方式,对实现分布式电源乃至配电网稳定、经济、高效的运行至关重要[5-7]。

然而,目前地市供电公司在应对此类问题时面临诸多协调困难,在未来高渗透率分布式电源接入局部地区配电网时,情况将会变得更加复杂。当前研究主要考虑高渗透率分布式电源接入对配电网的影响,从宏观的角度重点关注分布式电源或者配电网的规划、运行和控制等,较少有针对分布式电源具体接入方案的研究,对电力企业基层的实际工作指导性不强。因此,结合电网企业在分布式电源并网接入的典型方案设计方面所具有的工作基础,以及当前对高渗透率分布式电源接入配电网的相关研究[8-11],可更有效地优化系统运行,提升配电网的分布式电源接纳能力。

本文在重点分析分布式电源并网运行的制约条件和关键影响因素的基础上,从优化分布式电源并网运行方式的角度出发,提出了一种基于配电网接纳能力的分布式电源并网案例库构架。该框架一方面具有较好的实际操作性,另一方面也便于更好地适应未来配电网中不同分布式电源渗透率、网架结构和负荷水平下的典型应用场景,方便基层工作人员进行实际接入方案设计。

1 常见并网运行方式

分布式电源并网运行方式的选取不仅影响分布式电源与电网的综合成本和效益[4],还会影响周边用户的电能质量和配电网的安全运行[2-3]。一方面,分布式电源并网运行方式直接影响其并网成本,选取不当将增加不必要的电网建设和改造成本,还可能延长分布式电源的并网周期,影响分布式电源的经济效益;另一方面,分布式电源的接入会对周边用户的正常用电产生一定影响,通常会抬高线路末端的电压水平[12-13],波动性强的分布式电源还会降低当地的电能质量[14],大量接入时甚至会给电网的安全稳定运行带来潜在的风险[15]。

分布式电源并网运行方式主要包括并网接入方式和运行策略两方面内容。其中,常用的分布式电源并网接入方式包括专线接入、T 接接入和用户变接入等[16],设计时通常根据所接入配电网的网络和负荷情况进行选择,同时明确接入配电网的电压等级;运行策略按是否参与电网调度运行分为主动模式和被动模式,主动模式下分布式电源可为配电网提供更可靠的安全保障和更灵活的调度资源,符合未来主动配电网的发展趋势。

收稿日期:2018-02-09;**修回日期**:2018-09-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807134);国家重点研发计划项目(2016YFB0900100);国家发改委研究课题项目(分布式能源发展和利用研究);国网科技项目(应对高渗透率分布式能源接入的县域电网优化规划与协调控制技术及应用研究)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807134),the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900100),the National Development and Reform Commission Research Project of China(Research on the Development and Utilization of Distributed Energy System) and the Science and Technology Project of SGCC(Optimal Planning,Coordinated Control Technology and Application Research of the County Power Grid to Cope with the High-penetration Distributed Generation Integration)

1.1 并网接入方式

(1)并网接入方式需要关注的关键点。

分布式电源接入配电网时可选择不同的电压等级、接入位置和接入方式。电压等级分为接入10 kV、380 V/220 V这2类;接入方式可选择专线接入和T接接入2类;接入位置可选择接入变电站/配电室/箱变、开闭站/配电箱、环网柜和线路4类。

a. 接入电压等级。

对单个并网点而言,接入的电压等级应按照安全、可靠、经济的原则,根据分布式电源的装机容量、导线载流量以及上一级变压器及线路可接纳能力、短路电流、供电区电压偏差范围、区域内配电网综合情况等进行考虑。

一般,如果单个并网点容量在(0,8]kW范围内,以220 V电压等级单相接入;在(8,400]kW范围内,以380 V电压等级三相接入;在(400,6 000]kW范围内,以10 kV电压等级接入;在(6 000,20 000]kW范围内,考虑35 kV电压等级接入。以多个并网点接入的项目,总容量原则上不超出变电台区的允许容量。

b. 接入方式。

按照线路接入点位置可分为专线接入和T接接入,分别如附录中图A1和图A2所示。专线接入原则上送出线路应进入变电站或开关站间隔,且变电站或者开关站间隔内一、二次设备齐全;T接接入直接从线路上或者环网柜中引出一条分支线进行供电,分支点没有断路器、电流互感器(TA)等电气设备。专线接入方式没有改变配电网潮流单向流动的特征;而T接接入方式可能产生反送功率,引起电压越限和电流过载等问题,可能违反原负载线路上保护装置的整定要求。

一般而言,接入方式的选取需要考虑多种因素,包括分布式电源消纳方式、接入位置及附近电力设备布置情况等。用户内部电网接入的主要是自发自用余电上网模式的分布式电源,如园区和居民住宅的屋顶光伏;公共电网接入的主要是集中接入、全部上网的分布式电站,一般按照路径短、投资少的原则就近接入,具体选择T接还是专线接入需根据实际电网条件进行技术经济综合比较确定。

(2)典型接入设计。

文献[17]提出的典型接入设计方案主要针对10 kV及以下电压等级接入电网并且单个并网点总装机容量小于6 000 kW的分布式电源,该文献根据电源类型、接入电压等级、运营模式以及接入点的不同设计了不同的分布式电源接入系统方案。考虑逆变器、感应电机、同步电机3种分布式电源类型,并分别选取应用最广泛的光伏、风机和燃气轮机作为代表。

综合考虑,可利用文献[17]提供的分布式电源并网方式作为备选方案,结合典型案例的定量分析和优化结果进一步确定分布式电源的优化并网方式。

1.2 运行策略

分布式电源在配电网中的运行策略主要包括被动模式和主动模式2种。在被动模式下,配电网不对分布式发电系统进行出力控制,出力的多少完全由分布式电源自身决定;在主动模式下,根据电网实际运行情况对分布式电源进行出力控制,从而优化电网运行,保障电网运行的安全。

a. 被动模式。

在被动模式下,分布式电源接入配电网后的运行、控制和管理模式都不受配电网影响,在分布式电源渗透率非常低的情况下,无需投入任何配电网改造成本对线路进行改造升级。

b. 主动模式。

随着分布式电源的规模越来越大,电网对分布式电源不仅是被动地提出电能质量的要求,而且对其进行积极的调控和管理。在分布式电源出力较大时适当限制其有功出力,或者提供一定的无功支撑,形成大范围的资源优化配置,实现整体经济效益的最大化。

2 并网运行方式的影响因素

为合理选取分布式电源并网运行方式,应充分考虑分布式电源的技术类型、装机容量以及所接入配电网的电网条件和负荷水平等。为提高分布式电源并网运行方式选取方法的通用性和有效性,选择不同的分布式电源类型、装机容量等构建配电网典型场景,基于典型场景对分布式电源并网运行方式进行技术经济分析,并最终根据典型场景和最优并网运行方式的一一对应关系建立分布式电源并网案例库。

2.1 渗透率

各国在制定分布式电源管理办法时,通常对分布式电源容量或渗透率提出明确要求。分布式电源渗透率用于衡量指定区域内分布式电源接入水平,通常用台区分布式电源接入容量和变电容量或最大年负荷的比值表示。此处分布式电源渗透率定义为分布式电源装机容量占所接入配电台区用户最大负荷的比值。2种分布式电源渗透率的定义方式都是瞬时功率的表示方式,差别在于和变压器总容量还是峰值负荷相比,两者的差别也正好是容载比,就目前我国电网来看,取值多在2左右。与标幺值的方法类似,分布式电源渗透可以简单直观地反映分布式电源装机容量和负荷水平的关系,体现两者的关联性。

一般而言,分布式电源渗透率越高,发生电压越限和潮流倒送的风险越大,通常用准许渗透率来衡量一个配电区域接纳分布式电源的能力。实际准许渗透率还受分布式电源接入位置和出力特性等影响,当分布式电源与负荷时空分布特性匹配良好时,对电网的影响更小,准许渗透率更高。以户用光伏扶贫项目为例,用户多为日间发电、夜间用电,更易出现电压越限和潮流倒送问题。

欧美国家已开展分布式电源接纳能力的研究,主要影响因素包括配电网类型(城市/农村/半城市化)、设备过载能力、配电网负荷水平以及分布式电源技术类型及出力特性等。研究结果表明,渗透率低于 15%时对配电网影响不大[18-19]。

美国国家可再生能源实验室(NREL)利用大量典型测试案例和西部电网实际案例进行了分布式电源并网影响的仿真计算。研究表明:分布式电源对配电网的影响主要包括电能质量和保护两大类;分布式电源渗透率超过 20%时通常会对电网产生显著影响,难以满足分布式电源和电网互联标准;分布式电源渗透率小于 15%时基本不会对电网产生明显影响。

欧盟委员会委托德国、英国、法国等国研究机构开展了分布式电源接入对电网影响的研究,以英国和芬兰的实际电网作为研究对象,研究显示分布式电源渗透率超过 20%的时候将会对电网产生较大影响。

2.2　技术类型

按照我国分布式电源的定义,分布式电源包括小水电、风电、太阳能发电、生物质发电、海洋能发电、地热发电、资源综合利用发电、煤层气发电以及天然气热电冷联供等多种类型。不同类型分布式电源的运行特性和控制方式不同,对电网的影响也不同。例如,按照并网技术类型来划分:一类是电机类的分布式电源,包括使用同步发电机的分布式电源,如常用的直驱型永磁同步风力发电机、微型燃气轮机,以及使用异步发电机的分布式电源,如异步风力发电机;另一类是逆变器类的分布式电源,如光伏发电系统。由于两者的并网技术特性差异很大,因此 2 种技术类型的分布式电源对并网运行方式选择的影响也不同。

总体来看,配电网接纳分布式电源的能力不仅取决于分布式电源的容量,还取决于分布式电源的类型。一般而言,单个并网点接入多个分布式电源,其渗透率等于单个分布式电源渗透率的叠加,但考虑不同分布式电源的运行特性及对配电网的影响不同,分析时宜区别对待。

2.3　电网类型

电网供电区域按照行政级别进行划分,其对电网结构、负荷密度、电压合格率、配变容量以及线路参数等影响较大。电网供电区域可划分为市中心区域(A 或 B 类)、市区(B 或 C 类)、城镇(B、C 或 D 类)、农村(D 或 E 类)。其中,农村电网(D 或 E 类供电区)多采用架空线,配变容量较小,线路较长,因此阻抗相对较大,容易出现电压升高问题,同时线路载流量较小也容易引起电流过载问题,线路和变压器等改造成本相对要大,但是由于现有短路电流水平普遍不高,允许分布式电源在故障时提供的短路电流相对较大,因此,断路器的改造成本相对要小。而市中心电网通常采用电缆,配变容量大,长度也较短,因此阻抗相对较小,相对不容易出现电压越限和电流过载的问题,线路和变压器等改造成本相对较小,但是由于现有短路电流水平可能较高,允许分布式电源在故障时提供的短路电流相对较小,因此,断路器的改造成本相对较大。

2.4　负荷分布条件

不同的负荷分布对分布式电源的接纳能力不同。负荷分布方式可以初步分为 3 种,分别是集中于线路首端、均匀分布、集中于线路末端。一般而言,当负荷分布在线路末端的时候,线路首末两端电压差最大,此时分布式电源在末端接入可以缓解电压跌落问题,同时避免线路末端电压受分布式电源接入抬升幅度过大造成电压越限。理论上,分布式电源接入位置和负荷分布一致性越好,对电网的影响也越小。

3　分布式电源并网运行方式优化思路和案例库确定

3.1　主要思路

分布式电源并网运行方式的选取受诸多因素影响,考虑分布式电源的技术类型、装机容量以及所接入配电网的电网条件和负荷水平等构建典型场景下的案例库,可为选取分布式电源并网运行方式提供优化方法。

目前,各地在分布式电源并网运行时,在确保电网和分布式电源安全运行的前提下,综合考虑各种分布式电源容量和远期规划容量等因素,经过潮流计算、短路电流、无功平衡、电能质量分析等大量电气计算,最终完成相应的设计方案和电气设备选型,但没有考虑分布式电源并网方式优化的问题。

针对影响分布式电源并网的关键制约因素,本文提出分布式电源并网运行优化思路,如图 1 所示。

a. 并网方式的确定。

考虑分布式电源的类型和容量、负荷水平和电网条件 4 项主要影响因素,确定分布式电源的并网方式,具体方法如下。

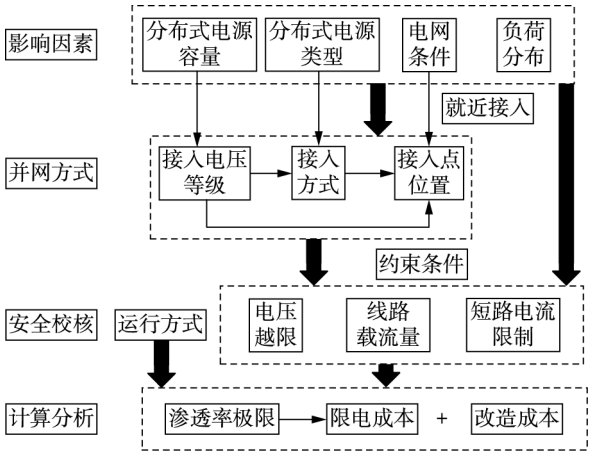

图1 分布式电源并网运行优化思路

Fig.1 Optimal grid-connected operation thinking of distributed generations

第1步,确定并网点的电压等级。为了使公共连接点处的电流控制在安全范围内,选定适合分布式电源接入的电压等级,一般按照项目容量就近接入允许的最低电压等级电网。基本原则如1.1节所述。该方式是配电网实际工作中的一种简化处理,包含了对技术可行性以及经济适用性的综合考虑。

第2步,确定接入方式。对于已确定分布式电源类型和装机容量的情况,可在表1所示的8种接入方式[17]中进行选择。

表1 分布式电源接入系统方式

Table 1 Distribution generations access to system

接入电压	装机容量/kW	接入方式
10 kV	(400,1 000]	T接公共电网10 kV线路,或者用户10 kV母线,或者公共电网变电站10 kV母线专线
	(1 000,6 000]	公共电网10 kV开关站、配电室或箱变,或者公共电网变电站10 kV母线专线
380 V	(0,20]	公共电网配电箱/线路,或者用户配电箱/线路
	(20,100]	公共电网配电箱/线路,或者公共电网箱变或配电室低压母线,或者用户箱变或配电室低压母线
	(100,400]	公共电网箱变或配电室低压母线,或者用户配电箱/线路,或者用户箱变或配电室低压母线

实际选择时,不仅要考虑接入电压等级和分布式电源容量,还要根据实际电网条件选择接入点位置,包括考虑分布式电源接入点距离、消纳方式等。以宁夏地区分布式光伏为例,采用公共电网10 kV母线专线接入方式更为常见,这种方式也是分布式光伏接入的主要方式。低压分布式光伏受到场所制约大多采用用户配电室380 V侧接入电网。

b. 安全校核。

分布式电源并网给配电网运行带来潮流、电压、电能质量、供电可靠性等多方面影响,安全校核主要考虑末端电压、线路载流量和短路电流3项制约分布式电源并网的关键因素。

c. 计算分析。

第1步,渗透率极限计算。结合安全校核的结果,可以判断不同分布式电源的类型和容量、负荷水平和电网条件下系统是否满足运行约束。保持其他条件不变,通过不断增加分布式电源的容量,重复安全校核操作,就可以得到满足安全校核条件的最大分布式电源容量,从而得到对应的分布式电源的渗透率极限。原则上,对不同类型的分布式电源需分别计算渗透率。

第2步,经济性分析。在渗透率极限计算的基础上,根据所选择的分布式电源运行方式,即主动模式或被动模式,可以判断不同运行时段分布式电源的限电或改造成本。

将电压越限、载流能力和短路电流作为约束条件,分布式电源类型与容量及接入位置(只考虑单点接入的情况)、负荷水平及分布、电网条件(区分农网和城网)等作为输入条件,接入方式、运行方式、电网改造措施等作为可变条件,渗透率极限和经济性分析作为最后的输出结果,采用优化(比选更为合适)的方法确定最佳的接入电压等级和接入方式。以下结合该模型,在典型场景和条件下,结合大量实际计算结果形成并网案例库,得到较为一般的结论和指导性原则。

3.2 分布式电源并网案例库

根据分布式电源并网运行方式优化的思路,对大量典型情景下并网运行方式进行优化,在此基础上梳理形成分布式电源并网案例库。案例库划分的基本考虑如下。

a. 不同分布式电源并网技术类型之间差异较大,是制约电网接纳能力的最关键因素,是案例库划分的首要标准。

变流器类型分布式电源主要带来电压越限和电流过载问题。分布式发电常位于配电网的终端,离负荷较近,输出的无功会使负荷节点处电压升高,甚至超出电压偏移标准。当分布式发电退出运行时,受其影响较大的节点负荷又因缺少电压支撑而遭受低电压等严重电能质量问题,受影响程度的大小与分布式电源的类型、位置和容量有关。

旋转电机类型分布式电源主要带来短路电流超标问题。分布式发电并网会增大配电网的短路电流水平,增加程度与分布式发电系统的技术类型、运行模式、装机容量、相对负荷大小、并网方式等都有关系。在配电网故障短路瞬间会有电流注入电网,可能导致断路器开断能力不足而不能有效切除故障,使故障扩大危及整个系统的安全运行。

b. 对于特定并网技术类型,项目所在变电台区的分布式电源渗透率是需要考虑的首要因素,也是分布式电源并网案例库的第 2 条划分标准。

参考美国经验,分布式发电渗透率低于 15%时可极大简化技术审查,至今已实行 18 a。15%的渗透率要求最早在美国加州 2000 年发布的“21 准则”中被提出,确定理由是:基于 50%的安全裕度考虑,认为当分布式发电装机容量小于最小负荷的 50%,即渗透率小于 15%时,基本不会对电网产生影响。

结合大量典型案例分析结果,将项目所在变电台区的分布式电源渗透率划分为小于 15%、15%~30%、大于 30%。

c. 引入相对容量参数(即项目容量和该电压等级典型经济传输容量上限比值),用以衡量不同电压等级下项目容量的相对关系,作为分布式电源并网案例库的第 3 条划分标准。

项目容量和接入的电压等级密切相关,但是需要注意的是,项目容量绝对值难以简单反映对电网的影响,还受到接入电压等级因素影响,这样将形成 2 个影响要素,增加并网运行方式选择的难度。从简化的角度出发,引入项目容量和该电压等级典型经济传输容量上限比(简称相对容量)这个参数,将容量和电压 2 个参数合并考虑。

结合 380 V 和 10 kV 常用典型线路的经济传输容量,将 400 kW 作为 380 V 典型线路经济传输容量,将 6 000 kW 作为 10 kV 典型线路经济传输容量。

d. 考虑到旋转电机类型,分布式电源容量不会很小,不会接入 380 V 电压等级,通常为 10 kV 以上。引入短路电流剩余比参数(即分布式电源提供的短路电流和该配电网剩余短路电流空间的比值),用以衡量不同电网等级下短路电流的相对关系,作为分布式电源并网案例库的划分标准。

从继电保护的角度讲,分布式发电可以等效用一个电源串联电抗的模型表示,对于不同类型的分布式发电,其电抗值也不同,因此故障电流的注入能力差别较大。例如,感应电机类的分布式电源在故障时最大的故障电流注入能力可以达到 1 000%。

选取典型城市 10 kV 配电网作为典型案例进行研究,由于城市电网通常采用低阻抗电缆,基本没有电压升高问题,但是短路电流问题较为突出,结果如表 3 所示。由于变流器类型分布式电源的短路电流和额定电流相差不大,因此对短路电流的贡献不大,并网渗透率受电网约束较小,分布式天然气发电能够提供较大的短路电流。因此,城市电网应重点关注短路电流主要受断路器遮断电流影响。

表 3　城市电网准许渗透率分析

Table 3　Analysis of permitted permeability in urban power system

技术类型	配电网准许渗透率/%	
	遮断电流 25 kA	遮断电流 20 kA
光伏发电(变流器类型)	>50	>50
天然气发电(旋转电机类型)	41.4	17.4

结合上述分析结果,从相对保守、保障安全的角度,将 5 kA 作为 10 kV 典型剩余短路电流空间,折合到整个变电台区,仍具有 8.6 MW 的容量空间。

根据大量典型分布式光伏发电案例的研究结果,结合案例库基本考虑,提出分布式光伏等变流器类型分布式电源的并网案例库,如图 2 所示。

在上述并网案例库中,重点考虑了技术类型、分布式电源所在变电台区渗透率现状、相对容量比、电网类型和负荷分布等情况,确定了并网运行方案。此外,关于接入电压等级的选择可以直接根据接入系统设计要求确定。

根据典型分布式天然气发电案例研究结果,结合案例库基本考虑,提出分布式天然气等旋转电机类型分布式电源的并网案例库,如图 3 所示。值得注意的是,由于分布式天然气发电带来的制约因素除了分布式光伏常见的电压问题之外,还有短路电流问题,因此,在选择分布式天然气等旋转电机类型分布式电源的并网运行方式时,应从图 2 和图 3 中各自选择,并选取要求更高的方式。

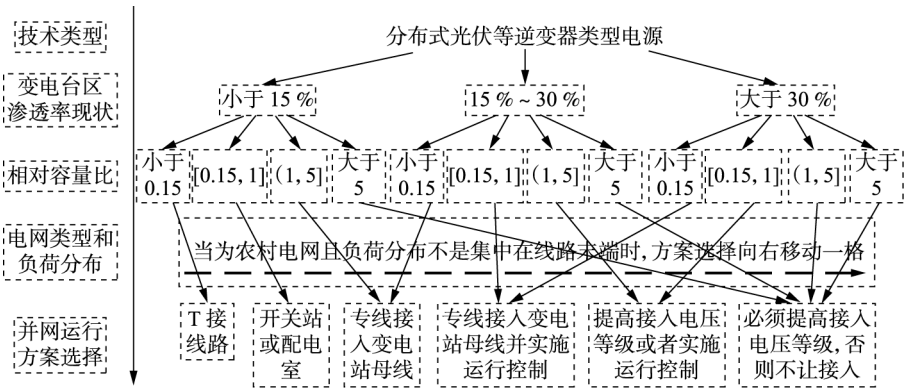

图 2　变流器类型分布式电源的并网案例库

Fig.2　Case library of grid-connected distributed generations with converter

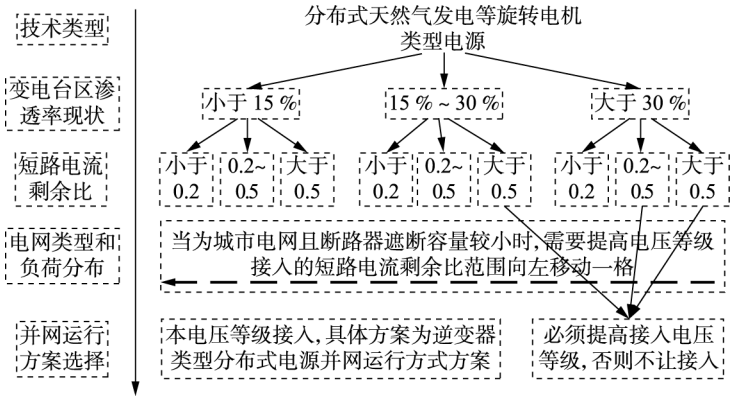

图3 旋转电机类型分布式电源的并网案例库

Fig.3 Case library of grid-connected distributed generations with rotating motor

4 结论

分布电源并网案例库的建设能够辅助地市级经研院所快速确定分布式电源并网运行方案,有效提高分布式电源并网服务效率。分布式电源不同的接入方式以及运行方式对电网系统的影响不同,考虑技术、经济等多重因素选择合理的分布式电源并网运行方式,对实现分布式电源乃至配电网的稳定、经济、高效运行至关重要。尤其是在高渗透率分布式电源接入局部地区配电网时,分布式电源的接入方式以及运行方式选择会变得非常复杂。建设分布式电源并网案例库能有效为地市级经研院所快速制定分布式电源并网运行方案提供辅助决策依据,从而大幅提高分布式电源并网服务效率。

同时,推广应用分布式电源并网案例库,可以为分布式电源创造接入电网便利条件,缩短并网时间,提高分布式电源建设的效率和效益;促进分布式电源并网规范化,统一并网技术标准,统一设备规范,保障分布式电源接入电网运行安全;节约工程投资,提高综合投资效益,确保分布式电源充分利用,促进分布式电源与电网发展的和谐统一。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14,23.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the microgrid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14,23.

[2] 程林,张靖,黄仁乐,等. 基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
CHENG Lin,ZHANG Jing,HUANG Renle,et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):282-287.

[3] 管霖,陈旭,吕耀棠,等. 适用于电网规划的光伏发电概率模型及其应用[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):1-7.
GUAN Lin,CHEN Xu,LÜ Yaotang,et al. Probability model of PV generation for power system planning and its application[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):1-7.

[4] 丁明,姚宇亮,李林,等. 分布式光伏并网装置的研制[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):1-6,15.
DING Ming,YAO Yuliang,LI Lin,et al. Development of distributed photovoltaic grid-connection device[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):1-6,15.

[5] 黄碧斌,李琼慧. 储能支撑大规模分布式光伏接入的价值评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):88-93.
HUANG Bibin,LI Qionghui. Value assessment for energy storage in supporting large-scale integration of distributed PV[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):88-93.

[6] DENHOLM P,MARGOLIS R M. Evaluating the limits of solar PhotoVoltaics(PV) in traditional electric power systems[J]. Energy Policy,2007,35(5):2852-2861.

[7] 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.

[8] DENHOLM P,MARGOLIS R M. Evaluating the limits of solar PhotoVoltaics(PV) in electric power systems utilizing energy storage and other enabling technologies[J]. Energy Policy,2007,35(9):4424-4433.

[9] 洪博文,李琼慧,何永胜,等. 虚拟电厂在分布式光伏发电应用示范区中的应用及前景[J]. 电力建设,2017,38(9):32-37.
HONG Bowen,LI Qionghui,HE Yongsheng,et al. Applications and prospect of virtual power plant in distributed photovoltaic generation application demonstration area[J]. Electric Power Construction,2017,38(9):32-37.

[10] 陈炜. 含电动汽车储能与分布式风力发电的虚拟发电厂优化运行[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):45-50,59.
CHEN Wei. Optimal operation of virtual power plant with electric vehicles and distributed wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):45-50,59.

[11] 黄辉. 风电有效投资规模及其敏感性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):42-50.
HUANG Hui. Effective investment scale of wind power generation and its sensitiveness analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):42-50.

[12] 裴玮,盛鹍,孔力,等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. 中国电机工程学报,2008,28(13):152-157.

PEI Wei,SHENG Kun,KONG Li,et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(13):152-157.

[13] 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 Zhiqun,ZHU Shouzhen,ZHOU Shuangxi,et al. Impact of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):56-60.

[14] 付学谦,陈皓勇,刘国特,等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(25):4270-4276.
FU Xueqian,CHEN Haoyong,LIU Guote,et al. Power quality comprehensive evaluation method for distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(25):4270-4276.

[15] 谢昊. 分布式电源对电网运行安全影响的研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
XIE Hao. Study of the effects of distributed generation on distribution system safety operation[D]. Chongqing:Chongqing University,2006.

[16] 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.

[17] 舒印彪. 分布式电源接入系统典型设计[M]. 北京:中国电力出版社,2014:26-55.

[18] BANK J,MATHER B,KELLER J,et al. High penetration photovoltaic case study report[R]. [S.l.]:NREL,2013.

[19] CAO D M,PUDJIANTO D,STRBAC G,et al. Costs and benefits of DG connections to grid system-studies on the UK and finnish systems[R]. [S.l.]:DG-GRID Project-European Commission,2006.

作者简介:

洪博文

洪博文(1985—),男,江西婺源人,高级工程师,博士,通信作者,主要研究方向为分布式电源和微电网的政策管理及优化规划(**E-mail**:bowenhh@sina.com);

黄碧斌(1982—),男,江苏宜兴人,高级工程师,博士,主要研究方向为新能源和分布式电源的政策管理及技术经济;

葛磊蛟(1984—),男,湖北咸宁人,讲师,博士,主要研究方向为智能配用电、新能源发电(**E-mail**:legendglj99@tju.edu.cn)。

Integration case library framework design of distributed generation based on distribution network adoption capability

HONG Bowen[1],HUANG Bibin[1],GE Leijiao[2],LI Qionghui[1],GE Di[3],HE Yongsheng[4]

(1. State Grid Energy Research Institute Co.,Ltd.,Beijing 102209,China;
2. School of Electrical and Information Engineering,Tianjin University,300072,China;
3. Xuchang Power Supply Company of State Grid Henan Electric Power Company,Xuchang 461000,China;
4. State Grid Corporation of China,Beijing 100031,China)

Abstract:The capacity and integration mode of distributed generation affect the safe and stable operation of distribution network. Especially,when distributed generation integrated to local distribution network with high penetration in the future,the district power supply company will face the challenge of determining the integration scheme of distributed generation. The constraints and key influencing factors of integration operation of distributed generation are analyzed. From the perspective of optimizing the integration operation mode of distributed generation,an integration case library framework of distribution generation based on distribution network adoption capability is proposed,which aims to provide theoretical guide for the systemic case study and fast making and optimization of integration scheme of distributed generation.

Key words:distribution network;adoption capability;distributed power generation;integration case library

附录：

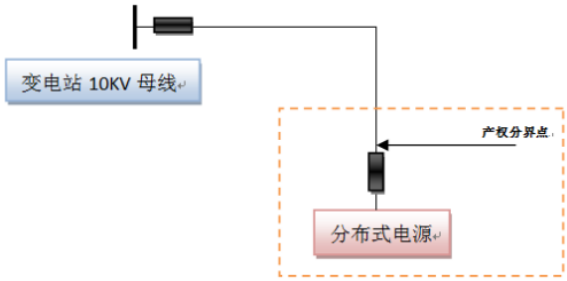

图 A1 分布式电源专线接入方式

Fig.A1 Dedicated access mode of distributed generations

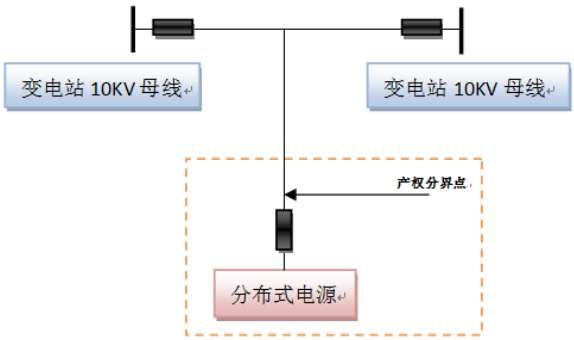

图 A2 分布式电源 T 接接入方式

Fig.A2 T connection mode of distributed generations