

配电网接纳分布式电源能力分析

吴 骏

(国网无锡供电公司,江苏 无锡 214061)

摘要: 分布式电源接入配电网会对系统的运行和可靠性产生重要影响,接入方式不当会影响到电网的安全运行。为了分析配电网接入分布式电源的容量的限制条件,考虑配电网不同的运行条件和方式,总结限制分布式电源接入的各种因素,提出一种结合静态安全限制因素定量计算和动态安全限制因素仿真校验的确定分布式电源准入容量工程化方法,通过算例的分析与计算表明该方法能够满足各种运行方式下配电网对分布式电源的接纳能力分析计算,在实际电网运行中具有较强的应用性。

关键词: 分布式电源;配电网;接纳能力;准入容量;算法

Abstract: The integration of distributed generation with distribution network will have important influence on the operation and reliability of the system, and the unreasonable integration may bring bad effect on the safe operation of power grid. In order to analyze the restrictive condition for the penetration level of distributed generation when integrated with distribution network, considering the different operating condition and modes of distribution network, the various factors which limit the integration of distributed generation are summarized. Then a method to determine the maximum penetration level of distributed generation is proposed based on the quantitative calculation of static safety limiting factor and the simulation verification of dynamic safety limiting factor. The calculation analysis shows that the proposed method can satisfy the analysis and calculation of acceptable capacity of distribution network when integrated with distributed generation under various operating condition, which has a strong applicability in the actual operation of power grid.

Key words: distributed generation (DG); distribution network; acceptable capacity; maximum penetration level; algorithm

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)01-0077-05

0 引言

随着能源需求和环境保护的压力越来越大,分布式电源得到了快速发展,分布式电源一般是指接近负荷、装机容量小、接入中低压配电网的小型电源,包括分布式电源和储能。分布式发电装置根据利用一次能源的形式不同,可分为热电冷联产发电、内燃机组发电、燃气轮机发电等利用清洁能源发电的单元和小型水电、风电、光伏发电、生物质能等利用可再生能源发电的单元。合理的分布式发电容量可以增加配电网的可靠性,降低线路损耗,支撑电压和改进负荷功率因数等,但分布式电源无限度地接入系统也会影响电力系统的安全运行^[1-3]。因此随着分布式电源的进一步发展,给定配电网接纳分布式电源的容量已成为电网规划和运行过程中十分关心的问题。

配电网接纳分布式电源的能力是指在一定技术指标约束的前提下,配电网系统所能接受的分布式电源的最大容量。根据配电网运行的不同约束条件,分布式电源准入容量确定的算法和模型较多。分布式电源接入电网对电网的电压分布、潮流和功率因素等造成影响,这些因素成为制约准入容量的约束条件,文献[4]基于电力系统静态安全约束建立了分布式电源准入容量的数学模型并提出了双层优化模型和相应的优化求解算法,文献[5]提出以接入点处过电压作为限制分布式光伏电源实际接入峰值容量的约束条件。文献[6-7]以负荷和分布式光伏电源引起的电压偏差和电压波动为约束条件的分布式光伏电源接入容量极限计算模型,推导了6种典型工况下的安全接入的容量限值。文献[8]基于静态负荷模型,以电压不越限、线路载流量和准入容量为约束条件,以网损最小为目标函数,建立了分布式电源的最优布置函数关系。文献[9]基于线

损最小为约束条件得到了分布式电源注入容量与接入位置之间关系的公式。文献 [10] 从投资费用、网损、电压指标 3 个主要技术指标建立分布式电源 (distributed generation, DG) 选址优化多目标计算模型, 提出基于熵和距离的多目标粒子群 (DEMPSO) 算法和模糊多权重 (FMW) 技术, 通过 DEMPSO 算法找到 DG 接入配电网的可行方案。文献 [11] 以潮流分布、电压分布、电能质量等为限制条件提出配电网改造目标, 利用层次分析法从分布式光伏能接入、能消纳、能稳定方面提出了电网改造措施。文献 [12] 提出了一种主动配电网规划 - 运行联合优化模型。文献 [13] 基于容量渗透率分析了配网在最小负荷限制下光伏并网的容量渗透率极限。文献 [14] 研究了分布式电源接入配电网将对配电网的短路电流水平产生的影响。文献 [15] 分析和对比了北美、欧洲和中国具有代表性的分布式电源并网标准。以上的这些研究主要偏重于分布式能源接入对配网影响某些方面, 其应用范围受到一定的限制。下面提出一种具有普遍性的分布式电源准入容量的分析方法, 能够满足各种运行方式下配电网对分布式电源的接纳能力分析计算, 在实际电网运行中具有较强的应用性。

1 分布式电源接入系统原则

1.1 分布式电源对系统影响

分布式电源接入配电网使系统从放射状无源网络变为遍布负荷和中小型电源的有源网络, 这将对系统的潮流分布、继电保护、网络损耗、电能质量、电网可靠性以及电网调度均产生重要影响^[14]。

分布式电源使配电网结构和潮流发生变化, 当配电网发生故障时, 传统的三段式电流保护加装自动重合闸装置的保护系统面临如下问题: 1) 分布式电源提供的短路电流与原系统提供的短路电流叠加, 将增大故障电流, 故障线路原保护整定值的保护范围增大, 可能造成相邻线路段电流保护的失配和误动; 2) 非故障线路流过分布式电源提供的反向短路电流, 如果非故障线路电流保护无方向闭锁装置, 短路电流超过速断保护整定值就会触发保护动作, 切除非故障线路扩大停电范围; 3) 分布式电源的存在可能产生非同期重合闸和故障点电弧重燃的问题, 造成瞬时故障重合闸失败进而转化为永久故障。

表 1 分布式电源短路电流

分布式电源	接口类型	短路电流(额定电流%)
太阳能发电、燃料电池、储能装置等	换流器	(100~400)% 持续时间由控制器设置决定
风力发电机	异步发电机	初始几个周波内 (500~1000)% , 10 个周波内衰减至可忽略量
微型燃气轮机	同步发电机	初始几个周波内 (500~1000)% , 衰减至(200~400)%

此外, 分布式电源对系统影响较为突出的是电能质量问题: 1) 分布式电源会改变配电网的潮流分布, 其无功电压特性各不相同, 从而使相关节点的电压偏差与原配电系统有很大差异; 2) 风电及光伏电站出力的间歇性和波动性, 以及切换操作运行方式引起的电压波动和闪变; 3) 分布式电源采用各种换流设备, 如整流器、逆变器等开关设备, 其工作过程中会产生一定的谐波电流, 属于系统中电子开关类谐波源。

1.2 分布式电源准入容量限制因素

分布式电源接入系统后需要有效出力, 保证发电负荷的功率平衡以及电网安全稳定, 准入容量的约束条件从技术方面可分为静态安全限制和暂态安全限制两类。

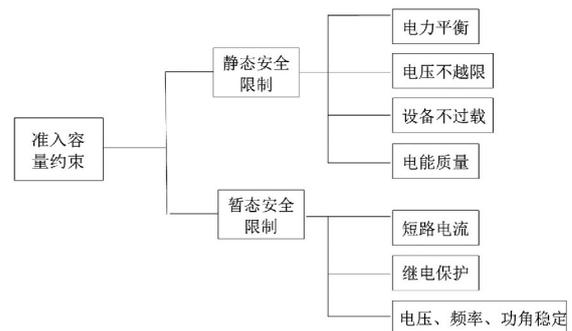


图 1 分布式电源准入容量限制条件

静态安全限制条件主要考虑分布式电源接入后, 系统负荷电源充足、相关节点电压不越限、输变电设备不过载、电能质量问题不超标等方面; 动态安全限制条件主要考虑接入分布式电源的配电网发生故障时, 短路电流不超过开关设备的开断容量, 继电保护能够正确动作切除故障, 系统功角、电压和频率都能够迅速恢复正常水平。

1.3 分布式电源接入条件

国内外标准对分布式电源的接入系统也有相关技术要求^[15-16], 其中《分布式电源接入电网技术规

定》Q/GDW 480-2010 规定了如下接入原则^[16]: 1) 并网点的确定原则为电源并入电网后能有效输送电力并且能确保电网的安全稳定运行; 2) 当公共连接点处并入一个以上的电源时, 应总体考虑它们的影响。分布式电源总容量原则上不宜超过上一级变压器供电区域内最大负荷的 25%; 3) 分布式电源并网点的短路电流与分布式电源额定电流之比不宜低于 10; 4) 分布式电源接入电压等级宜按照: 200 kW 及以下分布式电源接入 380 V 电压等级电网; 200 kW 以上分布式电源接入 10 kV (6 kV) 及以上电压等级电网。经过技术经济比较, 分布式电源采用低一电压等级接入优于高一电压等级接入时, 可采用低一电压等级接入。

配电网接纳分布式电源的最大容量需要满足标准要求的同时, 满足上述各类约束条件, 才能保证系统安全稳定运行。

2 分布式电源接纳能力分析

如前分析, 分布式电源的准入容量受到多种条件限制, 其中有些限制因素可以通过外界措施减弱或消除, 比如电压限制可以通过安装调压装置减小分布式电源引起的电压偏差, 继电保护可以通过调整动作整定值和增加方向元件来满足分布式电源接入后的适应性。根据工程实践, 静态安全限制因素中“设备不过载”便于量化, 因此以此为入口计算分布式电源准入容量。

另外, 不同的配电网运行条件和运行方式存在差别, 如有的配电网的上下网负荷不受限制, 有的配电网的上级电源功率受限, 这些对确定分布式电源的准入容量带来了复杂性, 需要分类研究。

2.1 上级电源功率不受限的配电网

对于上级电源功率不受限的配电网, 高压变电站上下网负荷只受到输变电设备容量的限制, 配电网的电力盈余和缺额由主网调节; 同时需要保证分布式电源接入后的短路电流不超过流经线路的热稳极限, 以及开关设备的开断容量; 电能质量和暂态稳定是否满足要求可以通过仿真计算校验。分析流程如下。

图 2 中, S_i 为分布式电源准入容量; S_{Li} 为分布式电源上网经过的第 i 条线路输送容量; S_{Tj} 为分布式电源上网经过的第 j 台变压器变电容量; $i, j = 1, 2, 3, \dots$; P_s 为输变电设备传输系统功率保留容量;

S_{g^*} 为不考虑电源功率受限的分布式电源准入容量。

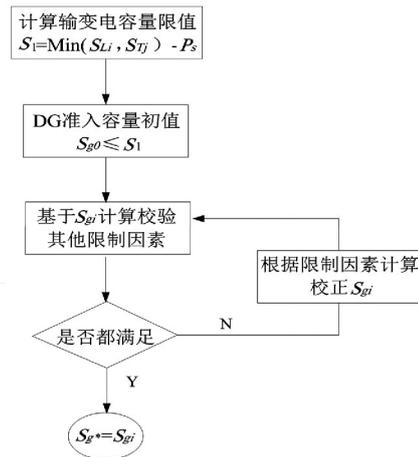


图 2 分布式电源准入容量分析流程

2.2 上级电源功率受限的配电网

有些配电网系统的上级电源或与主网联络线路的交换功率受限, 可调范围很小, 这种情况下的配电网类似独立系统, 负荷功率需要自给自足就地平衡, 这就需要考虑系统调峰能力的限制。

分布式电源准入容量的确定除了需要考虑输变电设备容量、线路的热稳极限以及开关设备的开断容量之外, 还需要分析配电网的负荷特性和分布式电源的出力特性, 计算系统的等效峰谷差, 保证配电网系统的调频容量不小于等效峰谷差。

系统等效峰谷差

$$\Delta L_{eq} = \max(L_t - P_t) - \min(L_t - P_t) \leq (L_{max} - P_{min}) - (L_{min} - P_{max}) = \Delta L + \Delta P \quad (1)$$

式中: ΔP 为分布式电源出力变化范围; ΔL 为系统负荷峰谷差; ΔL_{eq} 为系统等效峰谷差; L_t 、 P_t 分别为某一时刻系统负荷和分布式电源功率; L_{max} 、 L_{min} 和 P_{max} 、 P_{min} 分别为负荷和分布式电源出力的最大、最小值。

分布式电源准入容量

$$\eta S_{dg} \leq S_{ps} - \Delta L_{eq} \quad (2)$$

$$S_{dg} \leq S_{g^*} \quad (3)$$

式中: S_{dg} 为分布式电源准入容量; η 为考虑分布式电源转换效率和同时率的出力系数, 一般为 0.8 左右; S_{ps} 为系统的调频容量。

最后仿真计算校验电能质量和暂态稳定是否满足要求。

3 案例分析

某市一园区电网结构示意图如图 3 所示, 110 kV

主变压器容量为 1×150 MVA,变比为 110/35/10 kV,高压侧通过 LGJ-240 导线与主网相连,并接有常规电厂,出力 80~120 MW 可调;35 kV 侧典型日最大负荷为 76 MW,并有装机容量 30 MW 风电接入;10 kV 侧典型日最大负荷为 18 MW,并有 10 MWh 储能装置和 6 MW 光伏电站接入,限制配电网与系统交换功率不超过 60 MW,估算分布式电源的准入容量。

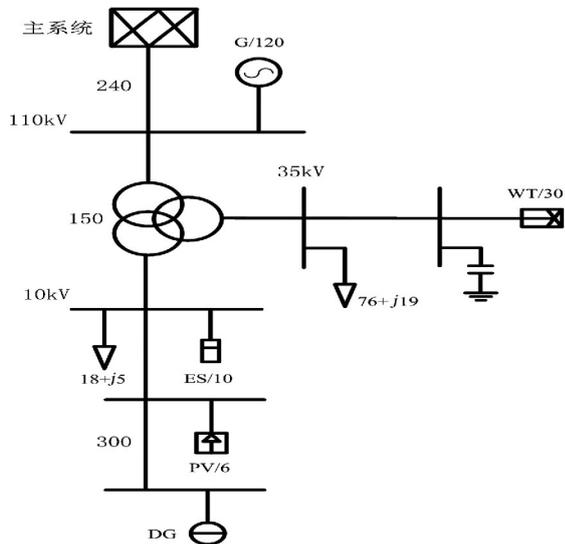


图3 某园区配电网结构示意图

3.1 不考虑配电网与主系统交换功率的限额

配电网最大运行方式下总负荷为 94 MW,最小运行方式下负荷按 30% 考虑为 28 MW;根据投运分布式电源的历史数据,综合出力范围为 0%~80% 装机容量。

可见大负荷小出力方式下,配电网系统存在下网负荷 94 MW,不超过设备容量;小负荷大出力方式下,配电网系统存在上网电力 $(36 \times 0.8) - (94 \times 0.3) = 0.6$ MW,新的分布式电源接入系统,上网电力不应超过设备输送容量。

110 kV 主变压器容量为 150 MVA,110 kV 线路的输送容量为 105 MW,常规电厂最小出力为 80 MW,因此配电网系统上网电力不应超过 25 MW,即可得出输变电设备容量限制的分布式电源接入容量为 30.5 MW。

3.2 限制配电网与系统交换功率不超过 60 MW

由前面分析可知配电网负荷峰谷差为 66 MW,考虑现状,分布式风电和光伏的等效峰谷差达到 94.6 MW,系统的调频能力为 $60 + 40 = 100$ MW,可得到新增分布式光伏不应超过 9 MW 的容量。

3.3 其他限制因素校验

根据上述分析结果,校验分布式电源接入系统的短路电流、稳定性和电能质量。仿真计算分布式电源接入线路三相短路故障,系统电压和频率如图 4 所示,故障后都能迅速恢复稳定;10 kV 母线短路电流为 9 kA,不超过 25 kA 校验值。

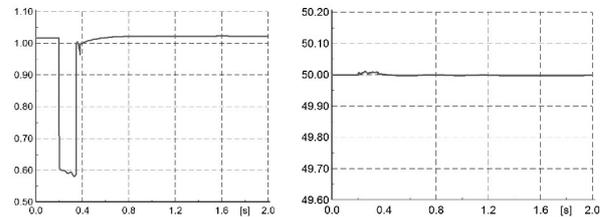


图4 系统电压和频率

校验分布式电源接入系统的电能质量,各项指标均符合国标限值标准,系统谐波如图 5 所示。

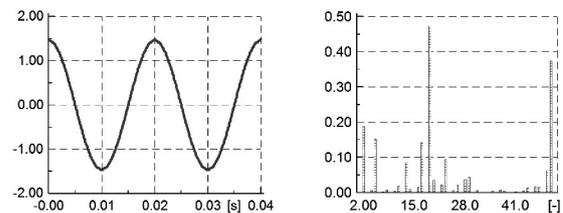


图5 系统谐波

4 结 论

通过以上分析研究和实例验证表明,在不同的配电网运行条件和运行方式下,通过静态安全限制因素定量计算、动态安全限制因素仿真校验,这种工程化方法确定分布式电源的准入容量,满足相关标准要求,并具有较强的适用性。

参 考 文 献

- [1] 于建成,迟福建,徐科,等.分布式电源接入对电网的影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(1):138-141.
- [2] 陈海焱,段献忠,陈金富.分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J].电网技术,2006,30(19):27-30.
- [3] 张立梅,唐巍,赵云军,等.分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):91-96.
- [4] 夏成军,崔弘,王强,等.考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算[J].电网技术,2009,33(16):96-100.
- [5] 范元亮,赵波,江全元,等.过电压限制下分布式光伏电源最大允许接入峰值容量的计算[J].电力系统自动化,2012,36(17):40-44.

[6] 黄炜,刘健,魏昊焜,等. 分布式光伏电源极端可接入容量极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 22-28.

[7] 刘健,黄炜. 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 299-306.

[8] 文升,顾洁,程浩忠,等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109-114.

[9] 钟嘉庆,叶治格,卢志刚. 分布式发电注入容量与接入位置的优化配置分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 50-55.

[10] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13.

[11] 孙芊,王倩,杨利萍,等. 针对分布式光伏接入的配电网改造方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 60-65.

[12] 沈欣炜,朱守真,郑竞宏,等. 考虑分布式电源及储能配合的主动配电网规划-运行联合优化[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1913-1920.

[13] 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.

[14] 杨杉,同向前,刘健,等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 07: 1977-1982.

[15] 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.

[16] Q/GDW 480-2010. 分布式电源接入电网技术规定[S].

作者简介:

吴骏(1966),高级工程师,长期从事电网管理、规划、基建工作。

(收稿日期: 2015-09-15)

(上接第53页)

```
##### 09 GOOSE-E42 (站控层GOOSE测试第二版) #####
< TestCase_Gop5 >
TestCase_Gop5
返回值 1 !
===== 09 GOOSE-E42 (站控层GOOSE测试第二版) 结束 =====

##### 09 GOOSE-E42 (站控层GOOSE测试第二版) #####
< TestCase_GosN1 >
TestCase_GosN1
Missing GOOSE message
开始时间: 08-18 12:31:14
=====

goose文本初始化成功!

设置stnum为:1 Snum为:1
正在发送报文, 请等待 6 秒...

设置stnum为:2 Snum为:1
正在发送报文, 请等待 6 秒...

退出goose发送
结束时间: 08-18 12:31:46
返回值 1 !
===== 09 GOOSE-E42 (站控层GOOSE测试第二版) 结束 =====
```

图5 站控层 GOOSE 测试

```
##### 14 GOOSE (过程层GOOSE测试) #####
< TestCase_GosN4 >
TestCase_GosN4
Out-of-order GOOSE message
开始时间: 08-18 18:31:00
=====

goose文本初始化成功!

设置stnum为:1
正在发送报文, 请等待 6 秒...

设置stnum为:2 Snum为:1
正在发送报文, 请等待 6 秒...

设置stnum为:3 Snum为:0
正在发送报文, 请等待 6 秒...

设置stnum为:4 Snum为:2
正在发送报文, 请等待 6 秒...

设置stnum为:5 Snum为:3
正在发送报文, 请等待 6 秒...

退出goose发送
结束时间: 08-18 18:31:32
返回值 1 !
===== 14 GOOSE (过程层GOOSE测试) 结束 =====
```

图6 过程层 GOOSE 测试

3 结 语

一致性测试是智能变电站内部智能电子设备互

操作的重要保障。基于闭环的一致性测试能够在保证测试可靠性和稳定性的基础上大幅提高测试效率;一致性测试硬件平台的引入,可以使得针对智能变电站的 IEC 61850 一致性测试更加全面和接近真实工况,能够进一步提升一致性测试的可靠性和效率。这一改进能够促进智能变电站在中国的发展以及 IEC 61850 标准在中国的推行,为智能电网在中国的发展奠定坚实的基础。

参 考 文 献

[1] 崔厚坤,汤效军,梁志成,等. IEC 61850 一致性测试研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 80-83.

[2] Tan J, Zhang C, Bo Z. The Importance of IEC 61850 Interoperability Testing [C]. Proceedings of the Universities Power Engineering Conference, UPEC 43rd International, IEEE, 2008: 1-5.

[3] 王德文,阎春雨,毕建刚,等. 变电设备在线监测系统中 IEC 61850 的一致性测试 [J]. 电力系统自动化, 2013, 2(19): 79-85.

[4] 王伊晓,刘东,陆一鸣,等. IEC 61968 消息一致性测试方法研究与实现 [J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2802-2809.

[5] 韩国政,徐丙垠,吕广宪,等. 基于 IEC 61850 的配网自动化通信技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 62-66.

[6] 辛耀中,王永福,任雁铭. 中国 IEC 61850 研发及互操作试验情况综述 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 1-6.

(收稿日期: 2015-11-12)