

# 基于 LCC 的配网多点分布式发电并网方案研究

林 涛

(达州电业局, 四川 达州 635000)

**摘 要:** 分布式电源并网会带给配电网多方面的影响, 为衡量不同地理位置的多台分布式电源并网方案的 (可靠性) 效益-成本, 将全寿命周期成本的概念引入配电网中。依据 LCC 的概念, 通过计算不同分布式电源并网方案的投资成本、维护成本、设备残值, 以及基于可靠性的平均停电损失费用, 求得不同方案下的量化成本, 并给出对应算例加以验证。

**关键词:** 分布式电源; 全寿命周期成本; 配电网; 可靠性效益-成本

**Abstract:** A wide range of effects will be brought into power grid when the distributed generations connect to the grid. A new manner which introduces the idea of life cycle cost (LCC) into the distribution network to measure the (reliability) benefit-cost of multiple distributed generations at different geographic locations is proposed. Based on the concept of LCC, the optimal solution of different grid-connected plan of distributed generations is obtained according to the calculation of the investment costs, maintenance costs, salvage value of equipment and the average interruption costs, and the relevant examples are given.

**Key words:** distributed generation; life cycle cost; distribution network; reliability benefit-cost

**中图分类号:** TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0022-04

## 0 引 言

随着科技的进步、环保意识的提高, 可再生能源受到越来越多的关注。近年来, 电力行业的相关部门也大量提倡将各种可再生能源发电技术以分布式发电 (distributed generation, DG) 的形式并入电网, 以提高供电的可靠性、高效性, 扩大供电范围。但传统的配电网以辐射型网络为主, 当 DG 并入配网后, 将引入逆向潮流, 改变各节点的电压分布, 对传统保护设备带来极大的冲击。此外, 可再生能源发电的分布式电源的输出电能具有较大的波动性, 并网后, 存在输出功率不稳定、谐波含量较大等问题, 控制不当会对电能质量造成一定的影响。为了较好地利用 DG 的优势, 尽量抑制其对配电网的不良影响, 大量机构、学者对 DG 的并网方案及控制方法进行了研究。

文献 [1-2] 基于双母线模型, 对单个分布式发电并入前后的负荷节点的电压变化情况进行了分析; 文献 [3] 基于辐射型配电网模型, 分析了多个分布式发电在不同位置、不同出力的情况下并网对配网的静态电压分布的影响; 文献 [4] 通过讨论多点分布式发电并网对电压的影响, 研究了通过变电站中央控制系统对 DG 进行电压控制的方案。然而, 现有的多数

研究, 都只是从技术层面对分布式发电的并网方案进行分析讨论, 没有考虑分布式发电并网的经济因素。

基于现有的分布式发电并网技术, 从全寿命周期成本 (life cycle cost, LCC) 最优的观点出发, 对不同的分布式发电并网方案进行 (可靠性) 效益-成本分析, 以确定对供电部门而言, 较优的多点分布式发电并网方案。为简化分析, 假设所有分布式发电均为供电部门投资建设的微型电源, 并且以供电部门的效益最优为先导。

## 1 分布式发电

分布式发电是指功率在几十千瓦到几十兆瓦范围内、模块式的、分布在负荷附近的清洁环保发电设施, 能够经济、高效、可靠地发电。分布式发电是区别于传统集中发电、远距离传输、大互连网络的发电形式<sup>[3]</sup>。目前, 常见的分布式发电主要有以气体或液体作燃料的内燃机、微型燃气轮机、可再生能源发电 (如太阳能发电、风力发电、潮汐发电等) 和各种工程用的燃料电池。

分布式发电的并网对现有的配电网络而言犹如一柄双刃剑, 安置恰当可以提高供电的可靠性, 安置不当则会降低原有供电可靠性, 影响电能质量。分布

式发电常见的优点主要有以下几种。

1) 分布式电源是相互独立的, 操作灵活, 且由于容量不大, 投切操作不会对系统的稳定性造成影响, 具有较高的灵活性和稳定性。

2) 大型的分布式发电系统可部分消除配电网的过负荷和堵塞, 增加配电网的输电裕度; 小型的分布式电源可直接作为重要负荷的后备电源, 故障发生时, 可迅速投入使用, 维持供电, 以提高供电可靠性。

3) 在偏远地区采取分布式发电, 可以节省投资, 降低能耗, 提高系统的经济性; 此外, 分布式发电具有较好的调峰性能, 可用其灵活的跟踪负荷的变化, 降低系统的运行成本。

4) 分布式发电多采用可再生能源, 排废量少, 清洁环保。

但是当分布式发电 (特别是大型分布式发电系统) 的位置、容量布置不当时, 也会对供电系统的保护设备、短路电流问题、可靠性、电网效益以及电能质量带来不利的影响。

## 2 配电网 LCC 分析模型

全寿命周期成本 (LCC) 是指设备或系统在整个寿命周期内所需要消耗的总费用, 它包括初期投资费用、运行维护费用和退役处理费用等。美国预算局将 LCC 定义<sup>[5]</sup>为: 大型系统在预定有效期内发生的直接、间接、重复性、一次性及其他的相关费用, 是设计、制造、开发、使用维修、支援等过程中发生的费用和预算中所列入的必然发生的费用的总和。

### 2.1 等年值法

配电网的全寿命周期成本是指系统从初期设计、设备购置到退役的整个寿命周期内需要的费用总和, 其费用是按时间顺序发生在整个寿命周期内, 而非只发生在投资初期, 故在分析中, 采用等年值法对配电网进行经济评估, 以避免由设备寿命差异带来的影响。

在经济学中, 资金是具有时间价值的。当前的一笔资金, 即使不考虑通货膨胀的因素, 也比将来同等数量的资金更有价值, 因为其可以在使用过程中产生利润。所以, 在对整个寿命周期内的效益-成本进行分析时, 应当把不同时刻的金额折算到同一个时间点上, 在相同的时间基础上对成本效益进行比较, 这就是等年值法<sup>[6]</sup>。

等年值法将资金的时间价值分为现值 P、等年值

A、将来值 F。其中, 现值 P 为当前时刻的等效金额; 等年值 A 为等额支付的金额, 通常每期为一年; 将来值 F 为资金换算到将来某一时刻的等效金额。三者之间的换算关系如下。

① 现值与将来值的关系

$$F = P(1 + i)^n \quad (1)$$

② 等年值与将来值的关系

$$A = F \cdot \frac{i}{(1 + i)^n - 1} \quad (2)$$

其中,  $i$  为贴现率;  $n$  为设备的使用寿命。

### 2.2 配电网的 LCC 计算模型

配电网的全寿命周期成本可以从初期投资成本、运行成本和退役成本 3 个方面统筹分析<sup>[7, 8]</sup>。

1) 初期投资成本: 由设备购置成本等年值 (如式 (3) 所示) 及方案设计费用的等年值 (如式 (4) 所示) 构成。

$$C_{is} = \frac{C_s(1 + i)^n i}{(1 + i)^n - 1} \quad (3)$$

$$C_{id} = \frac{C_d(1 + i)^n i}{(1 + i)^n - 1} \quad (4)$$

则总的初期投资成本为

$$C_i = (C_s + C_d) \cdot \frac{(1 + i)^n i}{(1 + i)^n - 1} \quad (5)$$

其中,  $C_s$  为设备的实际购置费用;  $C_d$  为配网方案的实际设计费用。

2) 运行成本: 由平均每年的设备维护费用 (式 (6) 和配网每年的停电损失费用 (式 (7)) 构成。

$$C_m = \sum N_{jm} \times C_{jm} \quad (6)$$

$$C_l = \sum_{p=1}^{L_p} \sum_{t=1}^{T_p} EENS_{pt} \times C_{LOSS_{pt}} \quad (7)$$

则总的运行成本为

$$C_c = (C_m + C_l) \cdot n \quad (8)$$

其中,  $N_{jm}$  为第  $j$  类设备平均每年的维护次数;  $C_{jm}$  为第  $j$  类设备平均每次的维护费用;  $L_p$  为配电网的负荷点总数;  $T_p$  表示第  $p$  个负荷点平均每年有  $T_p$  种停电持续时间;  $EENS_{pt}$  指  $p$  点第  $t$  次停电的失电量;  $C_{LOSS_{pt}}$  指  $P$  点第  $t$  次停电对应的单位停电损失。然而, 配电网中设备的种类繁多、数量巨大, 增大了设备维护参数统计工作的复杂度, 所以在这里的算例分析中, 采用等效人工费用的形式代替设备的具体维修费用。

3) 退役成本: 退役成本只考虑各设备退役后的残值, 在对设备残值进行评估时, 通常以当前的市场情况为参考, 故在 LCC 分析中, 可认为残值同初期的

投资成本一样,是发生在设备的寿命初期的,属于现值,故其等年值表达式如下。

$$C_{EA} = \frac{C_r(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (9)$$

其中,  $C_r$  为设备的残值。

4) 配电网的 LCC 模型:配电网的全寿命周期成本包括初期投资成本、运行成本及退役成本,其表达式为

$$LCC = C_i + C_c - C_{EA} \quad (10)$$

### 3 方案对比

多点分布式发电并网的方案有很多种,可以就地并网,也可以集中并网,并且根据每台分布式电源的并网位置和容量的不同,其对电网的影响也不同。首先以 DG 并网对配电网的电压分布的影响为依据,参考相关研究初步选定两种对比方案,然后设定算例,对两种方案分别进行 LCC 仿真计算,从而获取(可靠性)效益-成本对比结果,以确定可靠性及经济性双优的多点 DG 并网方案。

#### 3.1 并网方案初选

分布式电源靠近负荷,故其对电力系统有着多方面的影响。文中考虑 DG 对电网电压的支撑作用,并据此确定 DG 的初步并网方案。

由文献 [3] 可知,对于辐射型配电网,多个 DG 分别就地接入后,对馈线的电压分布的改善作用明显,各负荷节点的电压均有不同程度的上升,且越接近馈线末端,电压的提升幅度越大,对负荷节点的电压支撑是有利的。并且总出力相同的 DG,随每个分布式电源的接入位置不同,对电压的改善效果也不同,若所有的 DG 均在馈线后偏末端的位置接入,则对电压的支撑效果最佳。

当多个 DG 集中接入配电网时,对电压的分布情况也有一定的改善,但效果弱于分散接入。且根据集中接入点的不同,对电压的影响效果也不同。当从馈线首端(母线侧)集中并网时,整个馈线的电压分布同未接入 DG 时的电压分布情况大致相同,而当接入点越接近馈线末端,各负荷点的电压变化量越大。

在考虑 DG 并网后系统性能的前提下,以 DG 并网的经济性为主要的目标,故在选取方案时,应当计入一定的设备投资、系统改善费用等相关经济因素,综上所述,最终选定如下两个对比方案。

方案 1:分散并网,即多个 DG 分别就地并入 380

V 用户端电网。此方案以电压改善情况为先导。

方案 2:集中并网,即多个 DG 构成分布式发电系统集中从馈线母线侧并网(10 kV),此时配网的电压分布的变化最小,故控制策略、保护方案等方面不用作较大的改动。此方案以经济性能为先导。

#### 3.2 算例分析

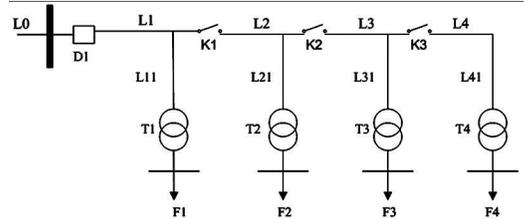


图 1 传统配电网

以图 1 所示的配电网为例,分别对 3.1 节中的两个方案进行 LCC 的定量对比,线路和分布式电源的参数如表 1 和表 2 所示,假设所有负荷均为静态恒功率负荷,且每个 DG 的出力恒定。

表 1 系统失效数据

元件	长度 /km	失效率 / (次 / km · a)	修复时间 / (h 次)
L <sub>0</sub>	1.5	0.1	4.0
L <sub>1</sub>	4	0.1	4.0
L <sub>2</sub>	1	0.1	4.0
L <sub>3</sub>	2	0.1	4.0
L <sub>4</sub>	3	0.1	4.0
L <sub>1</sub> 1	2.5	0.1	2.0
L <sub>2</sub> 1	3	0.1	2.0
L <sub>3</sub> 1	2	0.1	2.0
L <sub>4</sub> 1	2	0.1	2.0
变压器	\	0.06	100

表 2 分布式电源的出力和位置

分布式电源	出力 /kW	地理位置
DG1	300	F1
DG2	800	F2
DG3	300	F3

此外,在算例中,均将分布式电源作为后备电源考虑,当电网出现故障时, DG 优先向就近的负荷供电。且假定所需增设的设备寿命周期均为 20 年,每台设备的残值均为设备单价的 1%,贴现率为 10%,每度电售价为 0.6 元。

##### 3.2.1 分散并网

分布式电源按照表 2 所示的出力和位置接入配电网中。此时, DG 的输出电压通过电力电子逆变装置转换成 380 V 的工频电压后输送上网。由于是就地并网,所需增设的输电线路极短,可忽略不计,且在各 DG 处安装适当的刀闸以控制其投切。选用 NH2-100 型隔离开关,单价为 100 元/台,供需 3 个隔离开

关,则方案一 的 LCC 计算如下。

1) 初期投资成本

忽略方案的设计费用,则初期投资成本的等年值为

$$C_i = \frac{100 \times 3 \times (1 + 10\%)^{20}}{(1 + 10\%)^{20} - 1} = 352.379 \text{ 元}$$

2) 运行成本

运行成本由设备维护费用和平均停电损失费用组成,采用人工费用等效代替设备的维修费用。据统计数据可知,隔离开关维护的人工费用为 0.1 万/年。而通过建立 DG 并网后的网络模型,利用表 1 和表 2 中的数据,由故障模式分析法求得配网的平均年失电量 EENS 为 4 424.238 kW·h 则方案 1 的运行成本为

$$C_c = 1\,000 \times 3 \times 20 + 4\,424.238 \times 0.6 \times 20 = 113\,090.856 \text{ 元}$$

3) 退役成本

$$C_{ra} = 1\% \times C_i = 3.52 \text{ 元}$$

4) 全寿命周期成本

$$LCC_1 = 352.379 + 113\,090.856 - 3.52 = 11.344 \text{ 万元}$$

3.2.2 集中并网

分散于不同地理位置的 DG 集中在母线侧并网,则需通过升压变压器将逆变器输出电压升至 10 kV,选用 380 / 10 型变压器 3 台,单价为 15 万元/台,高压户外型刀闸 (GW9-10 / 400V) 3 台,单价为 260 元/台。并且由于非就地接入,则传输线路不可忽略不计,则 DG1~DG3 并网所需的输电线路分别长 3 km、4 km、7 km。

按照 3.2.1 中的步骤计算后有方案 2 的 LCC 数据如表 4 所示。

表 4 集中并网方案计算结果

名称	数据
初期投资成本等年值	85.837 万
维护费用	80 万
年平均失电量	14642.35 kW·h
停电损失	17.57 万
设备残值	8.5837 万

则方案 2 时的全寿命周期成本为

$$LCC_2 = 85.837 + 80 + 17.57 - 8.5837 = 174.8233 \text{ 万元}$$

对比两方案的计算结果可知,方案 1 不管从经济上还是可靠性指标上均优于方案 2。

## 4 结论及展望

通过 3.2 节中的算例分析可知,当 DG 作为后备

电源时,分散并网不但有效地改善了配电网的节点电压,一定程度地提高了网络的可靠性,而且与集中并网相比,其全寿命周期成本较低,整体的(可靠性)效益一成本较优。

但是,前面并未考虑 DG 并网对保护策略的影响,分散并网必然会为配电网带来逆向潮流,则会影响原有保护装置的正常工作,要确保网络的安全,则必须对保护装置进行改进,这部分的投资在文中是没有考虑的。此外,分散并网时负荷节点的电压变化率较大,则当 DG 退运行时会带来较大的电压波动,故在实际应用中,还要考虑对 DG 接入点安装无功补偿设备和能快速动作的电压支撑设备。相对而言,方案 2 中的 DG 母线侧集中并网方案不会带来逆向潮流,且接入点统一,整体控制较简易。故在今后的研究中,可将上述两点列入考虑范围,进行更加深入、全面的研究分析。

## 参考文献

[1] Caire R, Rrtiere N, Martino S et al. Impact Assessment of LV Distributed generation on MV Distribution Network[C]. Proceeding of 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Piscataway(NJ), IEEE, 2002(3): 1423-1428

[2] Conti S, Raiti S, Tina G, Small-scale Embedded Generation Effect on Voltage Profile: An Analytical Method[C]. IEE Proceeding—Generation Transmission and Distribution, 2003, 150(1), 78-86.

[3] 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

[4] K. Nara, S. Ishizu, Y. Mishima. Voltage Control Availability of Distributed Generators in Power Distribution System [C]. Power Tech, IEEE Russia, 2005(6): 1-6.

[5] 日比宗平. 寿命周期费用评价法——方法及实例 [M]. 北京:机械工业出版社,1984.

[6] 王锡凡. 电力系统规划基础 [M]. 北京:水利电力出版社,1994.

[7] 张桦,侯兴哲,基于 LCC 的配电网可靠性成本效益分析模型及应用 [C]. 中国设备管理协会设备寿命周期费用委员会第八次年会: 61-67.

[8] 张桦,刘华勇. 基于可靠性的电力系统设备 LCC 分析应用 [C]. 重庆市电机工程学会 2008 年学术会议论文集: 7-81.

### 作者简介:

林涛(1972),工程师,四川省达州电业局调度中心。

(收稿日期:2010-09-15)