

谐波约束下的配电网接纳分布式电源能力分析

高菲¹, 宋晓辉¹, 李建芳¹, 张瑜¹, 马维青², 贾志义²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

2. 国网山西省电力公司阳泉供电公司, 山西 阳泉 045000)

摘要: 逆变型分布式电源(DG)产生的谐波直接影响了DG在配电网的渗透率,从电压畸变和电流畸变2个制约因素分析配电网中压馈线对DG接纳能力的影响。推导DG和负荷分布位置对馈线电压畸变率的作用规律,以及考虑电流畸变率影响时最不利条件下的渗透率计算公式。提出基于随机场景的仿真计算方法,针对随机场景集合采用试探寻优的方法计算渗透率。算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 分布式电源; 接纳能力; 配电网; 谐波; 随机场景

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.003

0 引言

利用可再生能源的分布式发电技术是解决日益严重的能源和环境问题的有效手段。近年来在国家政策的大力扶持下,配电网中分布式电源(DG)并网规模不断增大,同时也给配电网的安全稳定和电能质量带来不利影响^[1-3],导致DG接纳能力受到制约^[4-5]。逆变型DG并网引起了大量谐波注入^[6-7],若要保证满足配电网对谐波的限值要求^[8],则必将制约DG并网规模。分析DG容量或出力对电压畸变和电流畸变的作用规律,计算DG准入渗透率,是合理规划DG并网、保证配电网安全稳定运行的技术保障。

配电网的结构和线路参数、DG的位置和容量、逆变器的谐波输出含量等因素共同作用造成了电网谐波状态,因此谐波限值影响下含DG配电网的运行分析问题是一个多维变量耦合问题,现有分析计算研究可分为优化方法和仿真计算方法2类。

优化方法利用优化搜索解决多变量耦合问题,主要以DG最大渗透率为优化目标。文献[9]提出一种基于解耦谐波潮流计算的混合整数非线性规划优化模型,同时利用粒子群优化算法求解DG最大渗透率时的容量和位置。文献[10]中优化模型以谐波畸变为约束,采用PSS/ADEPT进行谐波潮流计算。一些文献^[11-13]则从运行经济性出发,以网损、DG费用为优化目标,通过优化计算获取DG的位置和容量。这类模型并不以DG最大渗透率为优化目标,仅考虑谐波畸变约束。

收稿日期:2017-12-07;修回日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377148);国家电网公司科技项目(电网接纳分布式电源能力分析评估技术深化研究)(PD71-16-004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377148) and the Science and Technology Program of SGCC (Research on Analysis and Evaluation of Distributed Generation Penetration in Distribution Network) (PD71-16-004)

仿真方法通过不同场景设置和场景遍历解决多变量耦合问题。文献[14]设置不同的分布式光伏位置场景,得到谐波约束下最大渗透率。文献[15]提出三维度指标描述DG接入状态,计算谐波规律。文献[16]推导不同负荷类型的谐波闭环方程进行谐波分析。文献[17]根据不同的谐波注入计算低压配电网中的谐波畸变率,从而分析低谐波源的接纳能力。

综上所述,现有考虑谐波影响的分析方法多以场景遍历优化或是仿真解决多变量耦合问题,缺少必要的理论推导,导致结论和电网结构、线路参数关系紧密。本文力求从中压馈线出发,推导DG和负荷分布位置对馈线电压畸变率的影响,以及考虑电流畸变率影响时,最不利条件下的渗透率计算公式。这些由馈线获取的规律适用性强,能够有效指导DG并网和运行。同时本文构建随机场景集合并基于试探寻优的方法对渗透率进行仿真计算,有效验证了理论推导所得结论。

1 谐波影响理论推导

1.1 电压畸变率对DG接纳能力的影响

DG电力电子并网装置的输出电流含有很高的谐波含量,谐波电流以奇次谐波为主,考虑到变压器三角形接线可以避免3k次谐波电流,因此中压配电网中的谐波电流主要由5次、7次、11次、13次和17次构成。下面以10 kV中压馈线为例,在相关频次谐波的作用下,推导DG位置对电压畸变率的影响。在推导前,做出下列假设:

- 中压馈线线路参数一致;
- 考虑到变电站以上系统可视为无穷大系统且变电站内滤波装置对谐波的抑制作用,认为变电站对馈线上的谐波近似呈现短路状态;
- 将产生谐波的DG等效为谐波电流源,其各频次谐波电流大小与基波电流呈一定比例;
- 不考虑除DG外其他设备产生的谐波影响。

图 1 给出了含 DG 的中压馈线的电路图。图中 0、a 和 b 为节点编号, I_{DG}^k 为 DG 注入的 k 次谐波电流, V_a^k 和 V_b^k 分别为节点 a 和 b 处的 k 次谐波电压, Z_{ab}^k 和 Z_{a0}^k 分别为节点 a 到节点 b、节点 a 到首端之间线路的 k 次谐波阻抗。

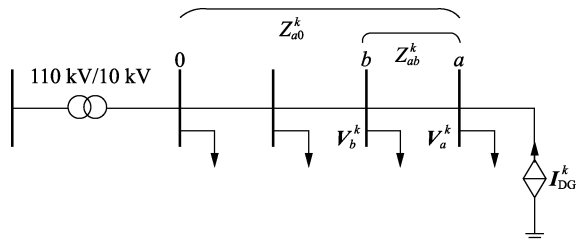


图 1 含 DG 的配电网中压馈线图

Fig.1 Medium voltage feeder of distribution network with DG

k 次谐波电流在节点 a 处产生的 k 次谐波电压为:

$$V_a^k = I_{DG}^k Z_{a0}^k \quad (1)$$

在 DG 输出功率一定的条件下, DG 接在馈线的任何位置, 其基波电流基本不变, 相应的各频次谐波电流也相同。因此并网位置不影响谐波电流注入, 但只有当 DG 接在馈线末端时, 产生的谐波电压最高。

因此在基波电压沿馈线下降的条件下, DG 接在馈线末端时, 各频次谐波电压最大, 而基波电压最小, 整条馈线电压畸变率最高, 此时 DG 接纳能力最小。

当渗透率达到一定程度后, 若基波电压并不是沿线下降的趋势, 存在功率反送情况下远离馈线首端节点电压反而升高的现象时, 谐波电压和基波电压均越靠近首端幅值越小, 因此需要进一步分析电压畸变率的变化趋势。线路末端的电压畸变率可表示为:

$$THD_{V_a} = \frac{\sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} |V_a^k|^2}}{|V_a^1|} \quad (2)$$

其中, Ω_h 为谐波频次集合; 上标“1”表示基波变量。

在前述的假设条件下, 线路谐波电压可视为沿着远离 DG 的方向按线路比例降低, 即存在:

$$|V_b^k| = \left| \frac{Z_{a0}^k - Z_{ab}^k}{Z_{a0}^k} \right| |V_a^k| \quad (3)$$

由于线路参数一致, 则阻抗比值可用线路长度比值表示:

$$|V_b^k| = \frac{l_{a0} - l_{ab}}{l_{a0}} |V_a^k| \quad (4)$$

其中, l_{a0} 、 l_{b0} 和 l_{ab} 分别为线路首端到节点 a、首端到节点 b 以及节点 a 和节点 b 之间的线路长度。

因此, 线路节点 b 处的电压畸变率为:

$$THD_{V_b} = \frac{l_{a0} - l_{ab}}{l_{a0}} \frac{\sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} |V_a^k|^2}}{|V_b^1|} \quad (5)$$

而节点 b 处的基波电压为:

$$V_b^1 = V_a^1 - (I_{DG}^1 - I_{La}) Z l_{ab} \quad (6)$$

其中, I_{La} 为节点 a 负荷电流; Z 为单位长度线路阻抗。

根据不等式公式, 式(6)可推导为:

$$|V_a^1| = |V_b^1| + |I_{DG}^1 - I_{La}| |Z| l_{ab} \quad (7)$$

结合式(5)和式(6)可得:

$$THD_{V_b} \leq \left(1 - \frac{l_{ab}}{l_{a0}}\right) (1 + \alpha l_{ab}) THD_{V_a} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{|I_{DG}^1 - I_{La}| |Z|}{|V_b^1|} \quad (9)$$

观察式(8)可知若存在:

$$\left(1 - \frac{l_{ab}}{l_{a0}}\right) (1 + \alpha l_{ab}) \leq 1 \quad (10)$$

即:

$$l_{a0} \leq \frac{1}{\alpha} + l_{ab} \quad (11)$$

则必存在:

$$THD_{V_b} \leq THD_{V_a} \quad (12)$$

考虑到中压馈线的实际载流量通常小于 400 A、线路阻抗幅值小于 0.5 Ω 以及电压最低限值不低于 0.93 p.u., 可得:

$$\frac{1}{\alpha} \geq 26.8 \quad (13)$$

因此当满足 $l_{a0} \leq 26.8 + l_{ab}$ 时, 式(12)必然满足。因此在负荷分布一定的条件下, DG 接入末端时电压畸变率最大。

下面讨论负荷位置对电压畸变率的影响。在 DG 接入馈线末端时电压畸变率最大的结论基础上, 负荷位置直接影响了线路末端基波幅值的变化, 进一步影响了最大电压畸变率的绝对值。负荷的位置越接近馈线末端, 则由于线路损耗导致的线路压降越大, 线路末端节点的基波电压幅值越小, 则电压畸变率的绝对值越大。

通过以上推导, 可得以下结论。

a. 当一般中压馈线线路长度小于 26.8 km 时, 谐波电压幅值下降速率大于在最大线电流和阻抗条件下的基波电压下降速率。因此无论潮流方向如何, DG 全部接入馈线末端时谐波电压最大, 且线路末端节点的电压畸变率最大, 对 DG 的接纳能力最小。

b. 负荷位置直接影响基波电压幅值降低大小, 因此当负荷均接在馈线末端时, 电压畸变率最大, 对

DG 的接纳能力最小。

1.2 电流畸变率对 DG 接纳能力的影响

高渗透率的 DG 并网对电流畸变率的影响很大,由于 DG 在馈线处可能存在局部功率平衡度较高的现象,直接导致了基波电流很小,而谐波电流较大的状况,使得馈线沿线电流畸变率不存在一致性变化规律。本文主要分析馈线首端电流畸变率对接纳能力的影响。如果不考虑中压线路的对地导纳支路,首端谐波电流是馈线上所有 DG 产生的谐波电流叠加之和,因此馈线首端的电流畸变率和 DG 位置关联性很小,主要是和 DG 出力相关。

线路首端的电流畸变率可表达为:

$$\text{THD}_{I_0} = \frac{\sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} \left| \sum_{i \in \Omega_{DG}} I_{DG,i}^k \right|^2}}{\left| \sum_{i \in \Omega_{load}} I_{load,i}^1 - \sum_{i \in \Omega_{DG}} I_{DG,i}^1 \right|} \quad (14)$$

其中, $I_{DG,i}^k$ 为第 i 个 DG 产生的 k 次谐波电流; $I_{load,i}^1$ 为第 i 个负荷基波电流; $I_{DG,i}^1$ 为第 i 个 DG 基波电流; Ω_{load} 为所有负荷集合; Ω_{DG} 为所有 DG 集合。

可以看出,电流畸变率最严重的情况将在满足下述条件时发生。

a. 在并网点电压和 DG 等效阻抗的共同作用下,各 DG 发出的谐波在叠加时相位相同,不存在幅值削减的情况,即:

$$\max \sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} \left| \sum_{i \in \Omega_{DG}} I_{DG,i}^k \right|^2} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{DG}} S_{DG,i}}{V_0^1} \sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} \alpha_k^2} \quad (15)$$

其中, $S_{DG,i}$ 为第 i 个 DG 出力; α_k 为多个逆变器综合后的 k 次谐波与基波比值。

b. 式(14)中分母处基波电流的叠加满足:

$$\min \left| \sum_{i \in \Omega_{load}} I_{load,i}^1 - \sum_{i \in \Omega_{DG}} I_{DG,i}^1 \right| = \frac{\sum_{i \in \Omega_{load}} S_{load,i} - \sum_{i \in \Omega_{DG}} S_{DG,i}}{V_0^1} \quad (16)$$

其中, $S_{load,i}$ 为第 i 个负荷功率。

因此首端电流畸变率最大为:

$$\max \text{THD}_{I_0} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{DG}} S_{DG,i} \sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} \alpha_k^2}}{\sum_{i \in \Omega_{load}} S_{load,i} - \sum_{i \in \Omega_{DG}} S_{DG,i}} \quad (17)$$

在满足电流畸变率限值的条件下, DG 出力和负荷必须满足:

$$\frac{\sum_{i \in \Omega_{DG}} S_{DG,i}}{\sum_{i \in \Omega_{load}} S_{load,i}} \leq \frac{\text{THD}_{I_0}^{\max}}{\text{THD}_{I_0}^{\max} + \sqrt{\sum_{k \in \Omega_h} \alpha_k^2}} \quad (18)$$

其中, $\text{THD}_{I_0}^{\max}$ 为首端电流允许的最大畸变率。

因为式(18)是在最极端的条件下得到的,所以它是一个比较严格的约束。

2 基于随机场景的仿真计算方法

上节推导了在单一馈线上电压畸变率和电流畸变率对 DG 接纳能力的影响,给出了电压畸变率最严重时 DG 和负荷位置,以及在馈线首端电流畸变率约束下最保守的 DG 总出力和负荷总功率比值。下面提出基于随机场景的仿真计算方法,通过随机场景法生成单一馈线上负荷和 DG 的各种可能组合场景,然后利用试探寻优方法计算在不同的制约因素影响下各种随机场景的 DG 最大准入渗透率。该方法对仿真场景的覆盖面广,可以有效验证上节推导结论。

随机场景法的具体步骤如下。

(1) 确定中压馈线阻抗、长度、节点位置、馈线总负荷。

(2) 选取一种 DG 并网制约因素(电压畸变率或电流畸变率)并设定限值,设置初始试探渗透率。

(3) 构建 $m \times n$ 维的随机场景:

a. 生成行数为 m 、列数为馈线节点数的各节点负荷随机占比矩阵;

b. 生成行数为 n 、列数为馈线节点数的各节点 DG 随机占比矩阵;

c. 根据试探渗透率和馈线总负荷,计算随机场景中 DG 的随机出力矩阵和负荷随机功率矩阵;

d. 将负荷和 DG 的随机占比矩阵进行遍历组合,可得到 $m \times n$ 维的随机场景。

(4) 利用试探寻优法逐步逼近最大准入渗透率。针对每个随机场景进行谐波潮流计算,判断所有场景是否满足制约因素限值规定,若满足则将该试探渗透率设置为可行渗透率,否则将该试探渗透率设置为不可行渗透率。完成本次试探渗透率计算后,在可行渗透率和不可行渗透率之间采用二分法计算下一次的试探渗透率,并和上一次试探渗透率进行比较,若小于一定阈值则认为试探寻优结束,输出最新的试探渗透率即可;若前后 2 次试探渗透率差距较大,则依据最新的试探渗透率重新计算。

图 2 给出了基于随机场景的仿真计算流程。

3 算例验证

上文推导了考虑谐波畸变制约的中压馈线对 DG 接纳能力影响的规律,本节将针对典型中压线路采用基于随机场景的仿真计算方法进行验证。表 1 给出了架空线路典型参数,其节点设置为平均分布。根据载流量可得单条馈线额定容量为 0.7 MW,算例负载率设置为 50%、70%和 90% 这 3 档。

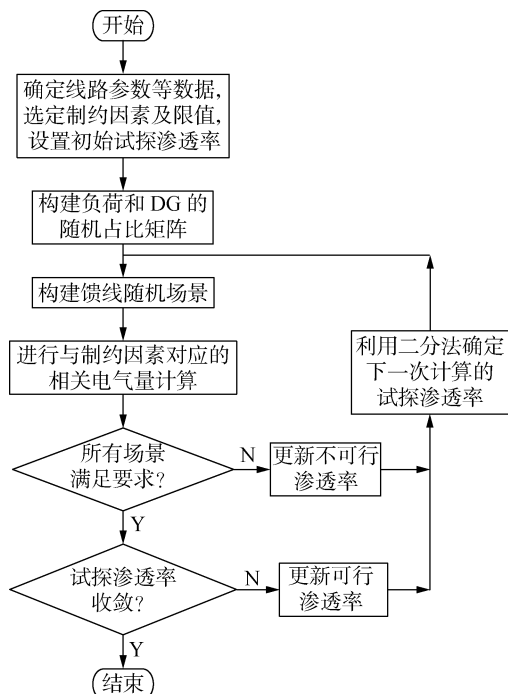


图 2 基于随机场景的仿真计算流程

Fig.2 Flowchart of simulation calculation based on random scenarios

表 1 中压线路参数

Table 1 Parameters of medium voltage feeder

参数	数值	参数	数值
电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.21	长度/km	5/7.5/10/12.5/15
电抗/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.373	节点数	5
载流量/A	400		

3.1 电压畸变率对接纳能力的影响验证

为验证 DG 和负荷均接在线路末端时对 DG 接纳能力最小的结论,利用上节所述方法产生 DG 和负荷分布的随机场景,并在随机场景中,将 DG 和负荷在线路末端的相似场景削减,构建一个对比的随机场景集合。电压畸变率限值设定为 5%,负荷功率因数(PF)为 0.9。DG 对配电网的谐波影响采用注入谐波电流源模拟,不同的逆变器输出各频次谐波占比不同,本文的谐波占比采用 IEEE 519—1992 设定的限值,如表 2 所示。

表 2 DG 输出谐波占比

Table 2 Output harmonic ratios of DG

谐波次数	谐波占比/%	谐波次数	谐波占比/%
5	4.0	13	2.0
7	4.0	17	1.5
11	2.0		

将随机场景以及 DG 和负荷均接在馈线末端的场景,结合不同的负载率和线路长度进行仿真计算,获取考虑电压畸变率制约下的渗透率结果如表 3 所示,此时渗透率为 DG 出力与线路容量之比。

由表中的数据可以验证以下结论。

表 3 电压畸变率制约下不同场景渗透率

Table 3 Penetration of different scenarios under constraints of voltage distortion

负载率/%	场景	渗透率/%				
		5 km	7.5 km	10 km	12.5 km	15 km
50	随机场景	100	74.6	49.2	37.7	31.5
	末端场景	100	57.2	38.7	31.5	27.2
70	随机场景	100	63.9	47.1	37.5	31.8
	末端场景	100	51.6	40.0	34.0	30.5
90	随机场景	100	62.3	46.9	38.3	32.4
	末端场景	100	52.7	43.0	37.7	31.8

a. 随着线路长度的增加,较大的线路阻抗使得相同谐波电流下的谐波电压增大,因而线路越长,考虑电压畸变制约下的 DG 准入渗透率越小。

b. 在相同的 DG 接入条件下,谐波畸变与线路阻抗直接相关,而基波值与负载率、线路阻抗均相关,因此电压畸变率与负载率和线路长度呈非线性关系。在本文线路中,线路较短时,随着负载率增大,准入渗透率呈下降趋势;线路较长时,随着负载率增大,准入渗透率呈上升趋势。

c. 在不同线路长度和负载率下,随机场景的 DG 准入渗透率均大于末端场景,验证了上文推导的 DG 和负载接在馈线末端时电压畸变最严重的结论。

对于 c 中结论,在负载率为 70%、线路长度为 10 km 以及最大渗透率的场景下,定义 DG (或负荷)乘以节点到首端的距离的总和为矩,图 3 进一步给出电压畸变率与 DG、负荷位置的关系。可以看出, DG 和负荷越集中于线路末端,线路电压畸变率越高,从另一角度验证了末端场景为电压畸变最严重场景的结论。

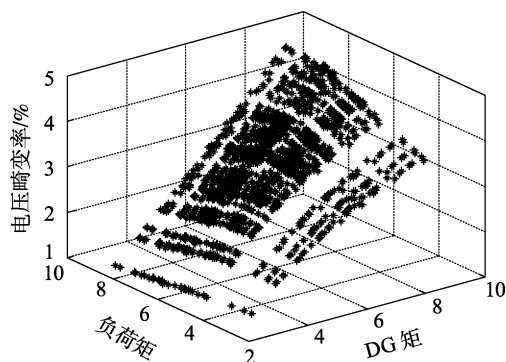


图 3 DG、负荷和电压畸变三维关系图

Fig.3 Three-dimensional relationship diagram of DG, load and voltage distortion

3.2 电流畸变率对接纳能力的影响验证

为验证电流畸变率对 DG 接纳能力的影响,下面针对负载率为 50%、长度为 10 km 的线路,改变各谐波占比和电流畸变率限值,并结合不同负荷功率因数,分别通过式 (15) 和随机场景仿真计算进行分析。注意由于电流畸变率和实际负荷直接相关,因此渗透率为 DG 出力和负荷功率的比值。

场景 1:谐波占比如表 2 所示,电流畸变率限值为 8%。

场景 2:与表 2 相比,5 次和 7 次谐波占比降为 3%,电流畸变率限值为 8%。

场景 3:谐波占比如表 2 所示,电流畸变率限值为 7%。

表 4 为谐波占比和电流畸变率限值对渗透率的影响,由表 4 可以得到以下结论。

a. 当功率因数为 1 时,基波电流同相位叠加作用使得电流畸变率最大,渗透率最小,此时随机场景仿真计算结果和式(18)一致。随着功率因数的降低,同相位叠加作用减弱,渗透率逐渐增大。

b. 场景 1 和场景 2 的结果比较表明谐波占比的降低能有效提升渗透率。

c. 场景 1 和场景 3 的结果比较表明电流畸变率限值的减小降低了渗透率。

表 4 谐波占比和电流畸变率限值对渗透率的影响

Table 4 Influence of harmonic ratio and current distortion limit on penetration

场景	计算渗透率/%	仿真渗透率/%		
		PF=1	PF=0.95	PF=0.9
1	55.2	55.1	59.8	64.4
2	60.1	60.2	66.0	72.8
3	51.9	52.0	56.1	59.4

构造一个包含各种可能场景的随机场景集合,进一步结合不同的负载率和线路长度,表 5 给出了随机场景仿真计算得到的渗透率结果。结果表明:

a. 由于此时渗透率是 DG 出力与负荷功率的相对比值,负载率对该相对比值几乎没有影响;

b. 由于谐波电流和电压在线路上不同的输出特性,线路长度对渗透率也基本没有影响。

表 5 负载率和长度对渗透率影响

Table 5 Influence of load rate and length on penetration

负载率/%	渗透率/%				
	5 km	7.5 km	10 km	12.5 km	15 km
50	70.7	71.1	71.5	71.9	72.3
70	71.2	71.7	72.3	72.5	73.1
90	71.4	72.1	72.9	73.6	74.2

4 结论

本文考虑谐波对 DG 渗透率的制约作用,分别从电压畸变和电流畸变 2 个方面对馈线接纳 DG 能力进行分析。在电压畸变率限制下,推导了 DG 和负荷分布位置对馈线电压畸变率的影响,得到一般线路条件下谐波与基波沿线变化率规律;在电流畸变率限制下,推导了最不利条件下的渗透率计算公式。同时本文提出构建随机场景集合并基于试探寻优的方法对渗透率进行仿真计算,有效验证了本文推导的结论。经过推导和验证的结论如下。

a. 当馈线线路长度小于一定长度时,谐波电压幅值下降速率大于基波电压下降速率,DG 全部接入馈线末端时谐波电压最大。DG 和负荷接在馈线末端节点的电压畸变率最大,对 DG 的接纳能力最小。

b. 考虑电压畸变制约下,DG 准入渗透率与线路长度呈反比关系,与负载率呈非线性关系。

c. 考虑电流畸变制约下,可得到由电流畸变率限值和逆变器谐波综合占比表示的最保守的渗透率计算公式,即负荷功率因数为 1 时该渗透率公式成立。

d. 考虑电流畸变制约下,负载率和线路长度对 DG 出力与负荷功率的相对比值几乎没有影响。

参考文献:

- [1] HOKE A, BUTLER R, HAMBRICK J, et al. Steady state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 350-357.
- [2] CHIDURALA A, SAHA T K, MITHULANANTHAN N. Harmonic impact of high penetration photovoltaic system on unbalanced distribution networks-learning from an urban photovoltaic network[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(4): 485-494.
- [3] 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.
- [4] 程超, 高厚磊, 邹贵彬, 等. 提升分布式电源接纳能力的配电网一次设备改造[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 102-107. CHENG Chao, GAO Houlei, ZOU Guibin, et al. Primary equipment retrofitting to enhance DG accommodation capability of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 102-107.
- [5] 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. WEN Sheng, GU Jie, CHENG Haozhong, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.
- [6] TONKOSKI R, TURCOTTE D, EL-FOULYTH M. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 518-527.
- [7] 侯桂兵, 涂春鸣, 罗安, 等. 微电网中 APF 接入位置与容量优化配置方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 29-33. HOU Guibing, TU Chunming, LUO An, et al. Optimal configuration of APF in microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 29-33.
- [8] IEEE Standard Board. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems; IEEE Standard 519-1992[S]. New York, USA: [s.n.], 1992.
- [9] PANDIV R, ZEINELDIN H H, XIAO W, et al. Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 97: 68-75.
- [10] 江南, 龚建荣, 甘德强, 等. 考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 19-23. JIANG Nan, GONG Jianrong, GAN Deqiang, et al. Calculation of allowable power value of distributed generation considering harmonic

- constrains[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3):19-23.
- [11] BISWAS S, GOSWAMI S K, CHATTERJEE A. Optimal distributed generation placement in shunt capacitor compensated distribution systems considering voltage sag and harmonics distortions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(5):783-797.
- [12] ABDELSALAM A A, EL-SAADANY E F. Probabilistic approach for optimal planning of distributed generators with controlling harmonic distortions[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(5):783-797.
- [13] KUMAR D S, SRINIVASANAN D, REINDL T. Maximizing DG penetration using optimal placement of shunt devices in distribution systems[C]//2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). Singapore: [s.n.], 2016:1921-1924.
- [14] 黄巍, 吴俊勇, 鲁思棋, 等. 电压偏差和谐波约束下配网光伏最大渗透率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6):49-55. HUANG Wei, WU Junyong, LU Siqi, et al. Maximum photovoltaic penetration considering voltage deviation and harmonic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6):49-55.
- [15] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化, 2014, 32(24):108-113. ZHONG Qing, GAO Xinhua, YU Nanhua, et al. Distributed power access capacity and access mode of active power distribution network considering harmonic constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 32(24):108-113.
- [16] BHOWMIK A, MAITRA A, HALPIN S M, et al. Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2):619-624.
- [17] WILLIAMSON G E, EMIN Z, POVEY I. Estimation of the limiting penetration of low carbon connections through an assessment of LV harmonics[C]// IET Conference on Power in Unity: a Whole System Approach. London, UK: [s.n.], 2013:1-4.

作者简介:



高 菲

高 菲 (1984—), 女, 河北沧州人, 博士, 主要研究方向为配电网建模仿真与运行优化技术 (E-mail: gaofei@epri.sgcc.com.cn);

宋晓辉 (1970—), 男, 河南驻马店人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要研究方向为配电网分析与控制 (E-mail: songxh@epri.sgcc.com.cn);

李建芳 (1981—), 女, 山西太原人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为配电网分析与控制 (E-mail: lijianfang@epri.sgcc.com.cn)。

DG integration capability of distribution network considering harmonic constraints

GAO Fei¹, SONG Xiaohui¹, LI Jianfang¹, ZHANG Yu¹, MA Weiqing², JIA Zhiyi²

(1. Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Yangquan Power Supply Company of State Grid Shanxi Electric Power Company, Yangquan 045000, China)

Abstract: The harmonics generated by the inverter-interfaced DGs (Distributed Generators) directly influence the penetration of DG in distribution network. The impact of medium-voltage feeder of distribution network on DG integration capability is analyzed from two restrictive factors, i.e. voltage distortion and current distortion. The functional rule of DG and load distribution position on voltage distortion of the feeder and the calculation formula of penetration under the worst condition with the consideration of current distortion are deduced. A simulation method based on random scenarios is proposed, which adopts the heuristic optimization to calculate the penetration according to the random scenario set. Case study verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: DG; integration capacity; distribution network; harmonic; random scenarios