基于谐波电压畸变率机会约束的光伏极限接入容量计算方法

陈 伟，吴建虎，裴喜平

（兰州理工大学电信学院，甘肃 兰州 730050）

摘要：在考虑光伏电源注入谐波幅值随机性的基础之上，采用机会约束规划来计算分布式光伏电源的极限接入容量。以接入光伏容量最大化为目标函数，节点电压偏差和单次谐波电压畸变率为确定性约束条件，电压总谐波畸变率为机会约束条件，建立光伏极限接入容量计算模型。运用粒子群优化算法对模型进行求解，基于拉丁超立方采样的谐波概率潮流计算结果检验机会约束条件，最后在IEEE 34节点系统通过与确定性规划作比较，验证了所提方法的有效性，为光伏电源接入规划提供了理论依据。

关键词：谐波畸变率；机会约束规划；粒子群优化算法；概率谐波潮流；极限接入容量

Calculation method of photovoltaic limit access capacity on the basis of chance constraints of harmonic voltage distortion

CHEN Wei, WU Jianhu, PEI Xiping

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Considering the randomness of the harmonic amplitude of photovoltaic power injection, chance constrained programming to calculate the limit access capacity of distributed photovoltaic power is used. Maximizing limit access capacity of PV is regarded as the goal, the voltage deviation and individual harmonic distortionare is regarded as the deterministic constraints, the total harmonic distortion of voltage is regarded as the chance constrained condition, calculation model of limit access capacity of PV is established. The particle swarm optimization algorithm is used to solve the model, and the harmonic probabilistic load flow calculation results based on the Latin hypercube sampling is used to inspect the chance constraints. By comparing the results of optimization with deterministic programming in IEEE-34 bus system, the validity of the proposed method are verified, and this method provides scientific decision basis for PV power planning.

Key words: harmonic distortion; chance constrained programming; particle swarm optimization algorithm; harmonic probabilistic load flow; limit access capacity

0 引言

分布式光伏电源并网导致大量的逆变器应用到系统中，对电网造成谐波污染。其中，谐波畸变是分布式光伏电源引起的主要问题之一[1]，随着分布式光伏电源在配电系统中渗透率的增加，将有可能导致电能质量恶化到超过国标的限值。因此，研究基于电压谐波畸变率机会约束的光伏极限接入容量计算方法对于含大量分布式电源配电网的运行有着极为重要的意义。

国家重点研发计划（2016YFB0601600）；国家自然科学基金项目（51767017）；甘肃省基础研究创新群体项目（18JR3RA133）

文献[2]提出了一种寻找DG接入位置和容量的方法，以实现新的保护协调方案和谐波限制。文献[3]在分别考虑配电系统7次和9次谐波电流限制（基于IEEE Std 519—1992）的情况下计算了DG的渗透率水平。文献[4]提出了在满足谐波畸变约束下的分布式电源最大准入功率优化计算模型，并分析了分布式电源接入位置和接入功率对电网谐波电压、电流分布的影响。文献[5]建立了节点电压和线路传输功率等限制因素影响下的最大准入容量计算模型，并结合谐波评估结果给出了综合考虑光伏接入容量和谐波畸变率大小的最佳光伏接入位置。文献[2-5]在研究分布式光伏电源的接入容量时，都采用了普通的确定性谐波潮流计算，没有计及光伏逆变器注入配电网谐波电流的随机性。文献[6]建议应采用给出概率密度曲线来比较评估谐波畸变率等级与所规定限值之间的差距。文献[7]提出各节点总谐波畸变值的概率密度函数这个概念，此密度函数可以直观地看出风机发出谐波对该节点的影响。文献[8]指出电网中谐波畸变和电能质量的评估不能忽视网络中注入谐波的随机特性，提出运用概率密度函数和累积分布函数评估电网的谐波畸变程度。

如果要求谐波畸变率在分布式光伏电源的任何出力情况下均满足质量要求，限制了分布式光伏的接入容量，使得规划结果偏于保守。针对上述问题，本文考虑了分布式光伏电源注入配电网谐波的随机性，在有些出现概率很小的场景下适当松弛对系统谐波电压畸变率的要求，即采用机会约束规划，利用概率谐波潮流得到系统谐波的统计特性，将系统谐波的概率评估结果作为检验机会约束条件的手段，结合粒子群优化算法，规划分布式光伏电源的接入，在不改变配电网结构的前提下，有效提升了系统的光伏电源渗透率。

1 分布式光伏电源容量的机会约束规划模型

1.1 分布式光伏电源谐波注入随机性及其处理方法

将光伏接入点看作*PQ*节点，假设光伏电源只输出有功功率，功率因数为1。由基波与谐波潮流计算可知，基波功率的变化势必会对谐波潮流分布带来影响，因此光伏逆变器注入电网的谐波电流也具有较强的随机性。为便于研究，本文借鉴了电流注入法对配电网的谐波分布进行分析，假定光伏电源注入节点的各次谐波电流的幅值仅与流过该光伏电源的基波电流的幅值成线性关系，不考虑相角。根据文献[9]，基波电流和各次谐波电流有效值可表示为

$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{\sqrt{6}}{\pi} I_{\mathrm{d}} \\ I_n = \dfrac{\sqrt{6}}{n\pi} I_{\mathrm{d}} \quad n = 6k \pm 1,\ k = 1,2,3,\cdots \end{cases} \tag{1}$$

式中，I_{d}为直流侧电流；n为谐波次数。

由式（1）可知，17次以上的谐波电流含量较少，故在研究过程中只考虑17次及以下的谐波电流。根据式（1）可以得到，5次、7次、11次、13次和17次谐波电流的幅值占基波电流幅值的比例分别为20%、14.29%、9.09%、7.69和5.88%。

基波概率潮流研究已经较为成熟，大多数文献中，都使用Beta分布来模拟光伏电源的输出功率分布。结合基波与各次谐波电流幅值关系的分析，给定一个光伏电源，随着环境条件如光照强度的变化，光伏电源的输出功率是一个随机变量，导致光伏逆变器注入配电网的各次谐波电流也是输入随机变量，其幅值在0与最大值（光照强度达到最大值时光伏电源注入的谐波电流）之间波动。

以谐波电压畸变率的概率统计结果作为机会约束条件，求解分布式光伏电源的极限接入容量，首先要量化计算系统谐波电压畸变率的概率分布。概率谐波潮流是求解谐波电压畸变率概率特性的基础。本文将拉丁超立方采样与谐波潮流解耦算法相结合，求解系统各个节点电压总谐波畸变率的概率密度函数。

图1为IEEE 34节点系统在节点15接入光伏电源后，节点15的电压总谐波畸变率概率密度函数，拉丁超立方采样次数为1 000次。

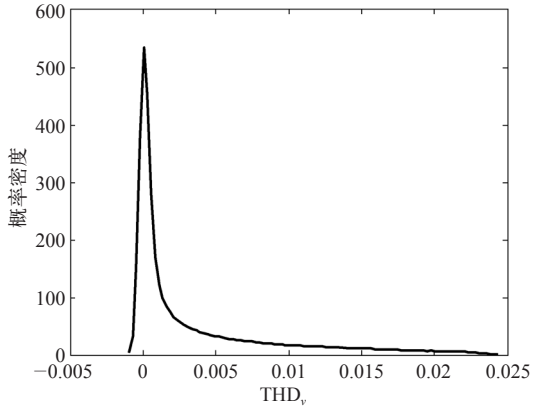

图1　节点15电压总谐波畸变率概率密度函数

Fig. 1 Probability density function of total harmonic voltage distortion at node 15

1.2　机会约束规划模型的建立

本文采用了机会约束规划的思想，考虑谐波电压畸变率在少数极端情况下允许越限，以此为基础评估分布式光伏电源的渗透水平和接入位置。因此，问题可以被转化为以接入光伏容量最大化为目标，电压总谐波畸变率为机会约束条件，电压偏差和单次谐波电压畸变率为确定性约束的机会约束规划模型。机会约束规划由Charnes和Cooper提出[10]，考虑到所作决策在不利情况下可能不满足约束条件，而采取一种原则：即允许所作决策在一定程度上不满足约束条件，但该决策应使约束条件成立的概率不小于某一置信水平α。

1.2.1 目标函数

本文的目标函数是接入配电网的分布式光伏电源容量之和，因此各节点光伏最大有功出力之和的最大值与配电网可接纳的光伏极限峰值容量等效[11]，即

$$F=\max\sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}}(P_{\text{DG},i}) \tag{2}$$

式中，N_{bus}为系统的节点数；$P_{\text{DG},i}$为节点i所接分布式光伏电源的有功功率。

1.2.2 等式约束

系统的等式约束为基波潮流方程，节点i的有功功率和无功功率方程为

$$\begin{aligned}P_{\text{G},i}-P_{\text{D},i}&=\sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}}\left|v_i^{(1)}\right|\left|v_j^{(1)}\right|\left|y_{i,j}^{(1)}\right|\cos(\theta_{i,j}^{(1)}-\delta_i^{(1)}+\delta_j^{(1)})\\Q_{\text{G},i}-Q_{\text{D},i}&=\sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}}\left|v_i^{(1)}\right|\left|v_j^{(1)}\right|\left|y_{i,j}^{(1)}\right|\sin(\theta_{i,j}^{(1)}-\delta_i^{(1)}+\delta_j^{(1)})\end{aligned} \tag{3}$$

式中，$P_{\text{D},i}$, $Q_{\text{D},i}$为节点i的基波有功功率和无功功率需求；$P_{\text{G},i}$, $Q_{\text{G},i}$为节点i注入的基波有功功率和无功功率；$v_i^{(1)}$为节点i基波电压的幅值；$y_{i,j}^{(1)}$为基波导纳矩阵中序号为(i,j)的元素的幅值；$\theta_{i,j}^{(1)}$为基波导纳矩阵中序号为(i,j)的元素的相角；$\delta_i^{(1)}$为节点i基波电压的相角。

1.2.3 不等式约束

本文的不等式约束由电压幅值、电压总谐波畸变率和单次谐波电压畸变率组成，其中电压总谐波畸变率采用机会约束。

（1）电压偏差约束

根据GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》，允许电压偏差为±5%，节点电压的幅值上下限分别为1.05 (pu)和0.95(pu)，如下式

$$V^{\min}<V_i<V^{\max} \tag{4}$$

式中，$V^{\min}$、$V^{\max}$分别为节点电压幅值的下限和上限。

（2）电压总谐波畸变率约束

根据GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》，电压总谐波畸变率不超过5%。

$$\Pr\{\text{THD}_{v,i}(\%)\quad\text{THD}_v^{\max}\}\quad\alpha \tag{5}$$

式中，$\text{THD}_v^{\max}$为任一节点所允许的电压总谐波畸变率的最大值；$\Pr\{\cdot\}$为$\{\cdot\}$中事件成立的概率；α为事先给定的置信水平，是一个不大于1的非负数。

（3）单次谐波电压畸变率约束

根据GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》，单次谐波电压畸变率不超过3%。

$$\text{IHD}_{v,i}^{h}\leqslant\text{IHD}_v^{\max,h} \tag{6}$$

式中，$\text{IHD}_v^{\max,h}$为h次谐波所允许的单次谐波电压畸变率的最大值。

本文的主要目的是计算以谐波畸变率为约束的光伏极限准入容量，因此在后面的计算中，设定三个约束条件的优先级为（2）>（3）>（1），

针对某一个具体的光伏接入方案，如果约束条件（2）和约束条件（3）都绝对满足，而条件（1）有极少数情况不满足，依旧认为此方案可行。

2 机会约束规划模型的求解

2.1 粒子群优化算法

文献[12]建议使用基于随机模拟的遗传算法求解机会约束规划，本文考虑使用粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization，PSO）求解该模型[13]，这种算法与遗传算法相比，具有实现容易、准确度高和收敛快等优点。

2.2 粒子群优化算法流程

本文在PSO流程的基础之上进行了改进，将概率谐波潮流计算与PSO相结合，得到了求解机会约束规划模型的流程，将接入节点i的光伏容量作为待优化参数，群中的每个粒子代表一组解。

1）输入测试系统数据，如节点数、支路数、基准容量和基准电压等。

2）输入光伏电源的谐波频谱数据、拉丁超立方采样次数和Beta分布相关参数。

3）输入粒子群算法参数，如种群数量，惯性因子ω，加速常数c_1、c_2，最大迭代次数$\text{iter}_{\max}$等。

4）迭代次数计数器t=0。

5）初始化粒子群，随机产生所有粒子的位置和速度。

6）进行概率谐波潮流计算，得到各个节点的THD_v等约束的概率统计特性。

7）计算种群中所有粒子的适应度函数fitness，违反机会约束的适应度为0，否则为接入光伏电源容量之和。找到每个粒子的最优位置p_{best}和整个粒子群的最优位置g_{best}。

8）按式（2）和式（3）更新粒子的速度和位置。

9）进行概率谐波潮流计算，得到各个节点的THD_v等约束的概率统计特性。

10）计算种群中所有粒子的适应度函数fitness，违反机会约束的适应度为0，否则为接入光伏电源容量之和。找到每个粒子的最优位置p_{best}和整个粒子群的最优位置g_{best}。

11）经过与上一次迭代结果对比，对p_{best}和g_{best}进行更新。

12）如果满足终止条件，即达到最大迭代次数，输出最优解，否则转到（8）。

PSO算法初始参数的恰当选择可以提高算法的优化效率，本文经过多次参数调整对比，将c_1、c_2选择为2.1、2.1，ω选择为0.6，种群粒子数为20，最大迭代次数$\text{iter}_{\max}$为200。

3 算例结果与分析

选用IEEE 34节点测试系统验证所提方法的有效性，系统基准容量为10 MV·A，基准电压为11 kV。光照强度数据为来自甘肃某地的辐照度样本，从该样本可求得Beta分布的形状参数分别为0.227 4、1.229 5。负荷采用恒功率静态负荷模型，总有功负荷为4.636 5 MW，无功负荷为2.873 5 Mvar。光电转换效率为0.13，拉丁超立方采样次数为1 000次，置信水平α取0.95。在研究过程中，忽略线路趋肤效应。

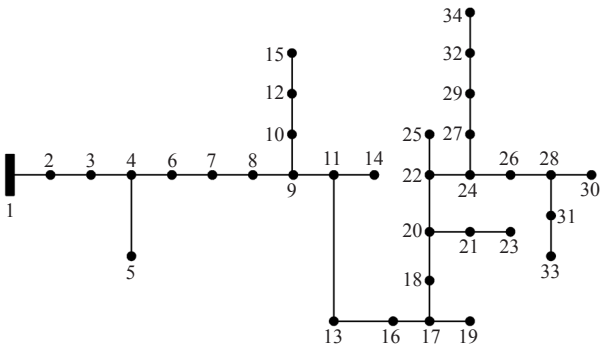

图2 IEEE 34节点辐射型配电系统

Fig. 2 IEEE 34 node radial distribution system

在进行光伏极限准入容量计算之前，作出以下说明：①不考虑谐波源之间、各次谐波电流之间的相关性；②光伏逆变器是配电网中唯一的谐波源，不考虑其他非线性负荷。

3.1 单节点接入

表1为光伏电源单节点接入配电网时的计算结果，节点1为平衡节点，计算过程中不接入光伏。从计算结果可以发现，节点2～6和节点13～16在同等的约束条件下光伏极限准入容量明显比其他

表1 单点接入光伏极限准入容量

Tab. 1 Single-node access distributed PV capacity calculation results

节点号	最大准入容量/MW	节点号	最大准入容量/MW	节点号	最大准入容量/MW
2	4.361	13	1.573	24	0.593
3	2.288	14	2.087	25	0.586
4	1.573	15	2.059	26	0.579
5	1.215	16	2.044	27	0.572
6	1.001	17	0.879	28	0.829
7	0.872	18	0.836	29	0.858
8	0.815	19	0.772	30	0.858
9	0.757	20	0.722	31	0.715
10	0.722	21	0.686	32	0.693
11	0.715	22	0.650	33	0.689
12	0.715	23	0.614	34	0.686

节点高。因此，配电网在接入光伏的过程中，上述节点违反约束条件的概率较小，可以优先考虑在上述节点接入光伏。

以光伏接入节点6为例，采用本文所提机会约束规划模型计算所得光伏极限接入容量为1.001 MW。由图3可知，各节点电压总谐波畸变率小于5%的概率都大于0.95，完全满足机会约束条件。由表2可知，各节点单次谐波电压畸变率最大值为0.52%，小于国家标准规定的3%。由表3可知，各节点电压幅值只有节点20~27稍低于0.95(pu)，其他节点都满足国家标准规定的0.95～1.05(pu)。因此，认为此接入方案可行。

表2 各节点单次谐波电压畸变率

Tab. 2 Individual harmonic distortion of all nodes

谐波	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9	节点 10
5	0	6.829 8e-04	0.001 3	0.002 0	0.002 7	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.0033	0.003 3
7	0	7.368 6e-04	0.001 4	0.002 2	0.002 8	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5
11	0	8.801 9e-04	0.001 7	0.002 5	0.003 3	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1
13	0	9.563 7e-04	0.001 8	0.002 8	0.003 6	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4
17	0	0.001 1	0.002 1	0.003 2	0.004 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2
谐波	节点 11	节点 12	节点 13	节点 14	节点 15	节点 16	节点 17	节点 18	节点 19	节点 20
5	0.003 3	0.003 3	0.001 3	0.001 3	0.001 3	0.001 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3
7	0.003 5	0.003 5	0.001 4	0.001 4	0.001 4	0.001 4	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5
11	0.004 1	0.004 1	0.001 7	0.001 7	0.001 7	0.001 7	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1
13	0.0044	0.004 4	0.001 8	0.001 8	0.001 8	0.001 8	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4
17	0.005 2	0.005 2	0.002 1	0.002 1	0.002 1	0.002 1	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2
谐波	节点 21	节点 22	节点 23	节点 24	节点 25	节点 26	节点 27	节点 28	节点 29	节点 30
5	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3
7	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5
11	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1
13	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4
17	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2
谐波	节点 31	节点 32	节点 33	节点 34						
5	0.003 3	0.003 3	0.003 3	0.003 3						
7	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5						
11	0.004 1	0.004 1	0.004 1	0.004 1						
13	0.004 4	0.004 4	0.004 4	0.004 4						
17	0.005 2	0.005 2	0.005 2	0.005 2						

表3 节点电压幅值

Tab. 3 Node voltage amplitude

节点号	电压幅值（pu）	节点号	电压幅值（pu）	节点号	电压幅值（pu）
2	0.993 1	13	0.986 7	24	0.947 3
3	0.987 0	14	0.986 4	25	0.946 0
4	0.978 6	15	0.986 3	26	0.945 6
5	0.971 3	16	0.986 3	27	0.945 4
6	0.964 3	17	0.959 9	28	0.960 3
7	0.960 5	18	0.956 1	29	0.960 1
8	0.958 4	19	0.952 0	30	0.960 0
9	0.955 9	20	0.948 7	31	0.954 4
10	0.954 7	21	0.945 8	32	0.954 0
11	0.954 2	22	0.942 5	33	0.953 8
12	0.954 1	23	0.949 8	34	0.953 8

注：节点1为平衡节点，电压幅值为1.000 0 (pu)

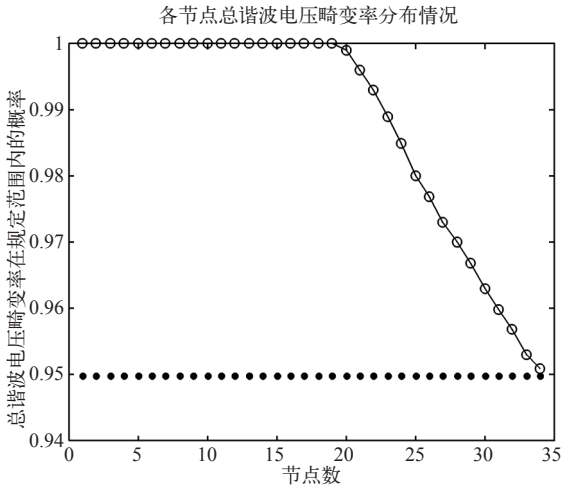

图3 各节点电压总谐波畸变率概率分布情况

Fig. 3 Total harmonic voltage distortion probability distribution of all nodes

表4为单节点接入下，光伏分别接入不同位置时机会约束规划与传统确定性规划计算所得光伏渗透率。

图4为采用试探法的确定性规划与本文所提机会约规划的对比图，采用机会约束规划模型计算光伏渗透率，并与采用试探法的确定性规划结果对比可以发现，在保证系统电能质量满足要求的前提下，系统的光伏渗透率有了明显提升。

3.2 多节点接入

表5为在节点8，节点20同时接入分布式光伏电源时的计算结果。置信水平取值为1，即代表采用确定性规划；置信水平取值小于1，代表机会约束规划。由表5数据可知，随着置信水平的降低，

表4 两种方法渗透率对比（%）

Tab. 4 Comparison of penetration rates between the two methods(%)

方法	节点 1	节点 2	节点 3	节点 4	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9	节点 10
确定性规划	0	55.05	28.84	19.65	15.33	12.70	11.00	10.49	9.57	9.04
机会约束规划	0	79.95	41.95	28.84	22.27	18.35	15.99	14.94	13.88	13.24
方法	节点 11	节点 12	节点 13	节点 14	节点 15	节点 16	节点 17	节点 18	节点 19	节点 20
确定性规划	9.04	8.91	19.91	26.73	26.22	26.07	10.87	10.49	9.70	9.04
机会约束规划	13.11	13.11	28.84	38.26	37.75	37.47	16.11	15.33	14.15	13.24
方法	节点 21	节点 22	节点 23	节点 24	节点 25	节点 26	节点 27	节点 28	节点 29	节点 30
确定性规划	8.52	8.12	7.74	7.48	7.33	7.20	7.20	10.36	11.00	10.87
机会约束规划	12.58	11.92	11.26	10.87	10.74	10.61	10.49	15.20	15.73	15.73
方法	节点 31	节点 32	节点 33	节点 34						
确定性规划	8.91	8.78	8.65	8.65						
机会约束规划	13.11	12.70	12.63	12.58						

系统的光伏极限准入容量增加，光伏渗透率明显提高。因此，在相同的约束条件下，采用机会约束规划可以提高系统的光伏渗透率，允许更多的光伏接入配电网。

表5 多节点接入分布式光伏准入容量计算结果

Tab. 5 Multi-node access distributed PV capacity calculation results

置信水平	光伏极限准入容量 /kW	渗透率（%）
1	（278，264）	9.94
0.95	（407，386）	14.54
0.9	（543，522）	19.52

机会约束规划的思想可以为实际配电网中光伏规划和接入提供一定的指导。农村电网与城市电网相比，重要负荷少，系统对电能质量指标如谐波畸变率等参数的要求较低。在计算农村配电网的光伏极限准入容量时，可将置信水平降低，即保证光伏接入后，大部分情况系统电能质量满足要求，只允许在一些小概率的情况下越限，同时，光伏的渗透率得到了较为明显的提升。

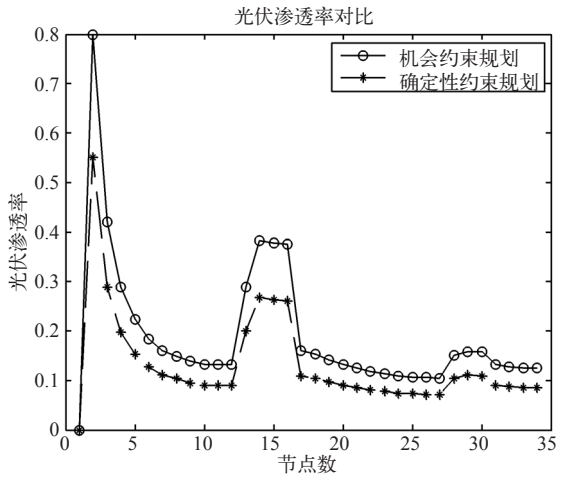

图4 机会约束规划与确定性规划渗透率对比

Fig. 4 Penetration contrast between chance constrained programming and deterministic programming

4 结束语

采用机会约束规划的思想，将确定性约束转化为机会约束，建立以电压总谐波畸变率等参数为约束条件，系统光伏接入容量最大化为目标的光伏极限准入容量计算模型。利用粒子群优化算法对该机会约束规划模型进行求解，在求解过程中，将拉丁超立方采样与谐波潮流解耦算法相结合，获得系统各个节点谐波参数的概率统计特性，并用此结果来检验机会约束条件。与传统确定性规划相比，主要有以下两点结论。

1）综合考虑光伏输出功率与注入系统谐波的随机性，更加符合实际情况。

2）将确定性约束改为机会约束的形式表示，在保证接入方案尽可能满足约束条件的同时，提高了系统的光伏渗透率。

本文在光伏多节点接入的计算过程中，没有考虑各个谐波源之间的相互影响，将在后面的研究中进行改进。

参考文献

[1] PANDI V R，ZEINELDIN H H，XIAO Weidong. Allowable DG penetration level considering harmonic distortions[C]. IECON 2011－37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society，Melbourne，VIC，2011：814-818.

[2] PANDI V R，ZEINELDIN H H，XIAO Weidong，Determining optimal location and size of distributed generation resources considering harmonic and protection coordination limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2013，28(2)：1245-1254.

[3] 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.

[4] 江南，龚建荣，甘德强. 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. Computing the maximum penetrating level of distributed generators in distribution network by taking into account of harmonic constraints[J]. Automation of Electric Power Systems，2007，31(3)：19-23.

[5] 管晟超，任明珠，谭佳，等．基于谐波约束的配电网光伏最大准入容量计算[J]．电网与清洁能源，2016，32(2)：89-95．
GUAN Shengchao，REN Mingzhu，TAN Jia，et al. Maximum penetrating capacity computing of photovoltaic power generation based on harmonic constraint in distributed generation[J]．Advances of Power System and Hydroelectric Engineering，2016，32(2)：89-95．

[6] IEEE Committee Report．IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems：IEEE Std．519－1992[S]．

[7] 张春杰，贾清泉．含双馈异步电机的概率谐波潮流计算[J]．电力电子技术，2011，45(11)：108-111．
ZHANG Chunjie，JIA Qingquan．Probabilistic harmonic load flow containing doubly fed induction generator[J]．Power Electronics，2011，45(11)：108-111．

[8] CAVALLINI A，MONTANARI G C，CACCIARI M．Stochastic evaluation of harmonics at network buses[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1995，10(3)：1606-1613．

[9] 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，2014，38(24)：108-113．
ZHONG Qing，GAO Xinhua，YU Nanhua，et al．Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constraint in active distribution networks[J]．Automation of Electric Power Systems，2014, 38(24)：108-113．

[10] CHARNES A，COOPER W W．Chance-constrained programming[J]．Management Science，1959，6(1)：73-79．

[11] 李滨，潘国超，陈碧云，等．满足电能质量限值的分布式光伏极限峰值容量计算[J]．电力系统自动化，2016，40(14)：43-50．
LI Bin，PAN Guochao，CHEN Biyun，et al. Limit peak capacity calculation of distributed photovoltaic with power quality constraints[J]．Automation of Electric Power Systems，2016, 40(14)：43-50.

[12] KAKUZO I，LIU Baoding．A genetic algorithm for chance constrained programming[J]．Journal of Information and Optimization Sciences，2013，17(2)：409-422．

[13] 王东风，孟丽．粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]．自动化学报，2016，42(10)：1552-1561．
WANG Dongfeng, MENG Li．Performance analysis and parameter selection of PSO algorithms[J]．Acta Automatica Sinica，2016，42(10)：1552-1561．

作者简介

陈 伟

陈伟（1976－），男，教授，博士生导师，主要研究方向为电能质量分析与控制。

吴建虎（1989－），男，硕士研究生，主要研究方向为光伏发电容量规划；

裴喜平（1980－），男，博士研究生，助理研究员，主要研究方向为电能质量分析。

(收稿日期：2018－12－21)EA