

一种基于分布式光伏容量配置策略的研究

熊伟鹏¹, 周圣², 万佳¹, 陈罡¹, 陶婧¹

(1. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司, 江西 南昌 330069; 2. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077)

摘要: 分布式光伏市场的日趋饱和及其多样性, 进一步加剧了投资风险。与此同时, 高比例、多馈入分布式光伏的接入给配电网的稳定性带来严峻挑战。因此, 文中依据国家能源局标准, 将分布式光伏分为 I、II 类, 并建立了分布式光伏全生命周期经济性模型。基于该模型, 从光伏服务商、电网侧双视角出发, 提出了一种综合考虑 I、II 类分布式光伏经济性和电网电压稳定性的容量配置策略, 并利用微分-细胞膜算法, 对所提策略进行优化求解; 最后, 基于 IEEE14 节点配电网, 通过多场景对比分析, 验证了该策略在提升光伏服务商经济性、电网稳定性上的适用性。

关键词: 分布式光伏; 经济性; 电网稳定性; 概率评估; 微分-细胞膜算法

中图分类号: TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2026)01-0017-05

0 引言

全国光伏装机容量增长迅猛, 截至 2025 年 3 月底, 全国光伏发电装机容量达到 9.45 亿 kW^[1], 同比增长 43.4%, 其中集中式光伏为 5.34 亿 kW, 分布式光伏 (distributed photovoltaic generation, DPG) 为 4.11 亿 kW, 占比 43.5%。在 2025 年一季度, 全国光伏新增并网容量 5 971 万 kW, 其中集中式光伏为 2 341 万 kW, 分布式光伏为 3 631 万 kW, 分布式光伏新增占比高达 61%。

光伏等新能源出力占比不断提高, 其间歇性、随机性、波动性特点弱化了电力系统转动惯量、阻尼以及电压支撑的能力^[2]。在高效消纳新能源的同时, 如何确保电力系统的稳定运行, 成为亟待解决的问题。

文献[3]提出了一种通过灵活性资源配置策略, 提升配电网 DPG 承载能力的方法, 构建了上层光伏承载力评估、下层灵活性资源配置的双层优化模型, 得到 DPG 最大评估结果和灵活性资源的最优配置方案。

在“双碳”背景下, 文献[4]着重研究了园区内分布式光伏和储能容量优化配置策略, 以年度用能成本最低、电网变异系数最小为目标, 构建了面向园区最优用能的分布式光伏及储能容量配置方法。

文献[5]针对高比例 DPG 的功率反送导致配电网出

现节点电压越限和配电变压器反向过载问题, 以 DPG 等效并网容量为目标函数, 建立中压配电网分布式光伏承载力评估模型, 在 IEEE33 系统和实际系统中论证了文中所提策略在提升分布式光伏承载力中的有效性。

综上所述, 当前的主要研究均是从电网侧出发, 而少有考虑光伏投资服务商投资回报的研究。因此, 文中从光伏服务商、电网侧两个层面出发, 在有限投资下, 提出一种综合考虑光伏投资经济性与电网稳定性的 DPG 容量配置策略, 在保障光伏服务商投资收益最大的同时, 确保配电网的稳定运行。

1 DPG 分类及数学模型

1.1 DPG 分类

国家能源局 2025 年下发《分布式光伏发电开发建设管理办法》(国能发新规[2025]7号)^[6], 用以规范引导 DPG 的发展, 将 DPG 分为两大类: 户用光伏、工商业光伏。户用光伏分为自然人和非自然人户用 DPG; 工商业光伏分为一般和大型工商业 DPG。文中依据该管理办法, 将电压等级低于 10 kV 的小型 DPG 分为两类: 1) 企业投资, 通过 10 kV 并网的非自然人户用或工商业 DPG 称为 I 类 DPG; 2) 自然人投资, 通过 380 V 并网的自然人户用 DPG 称为 II 类

收稿日期: 2025-08-12

作者简介: 熊伟鹏(1994), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为分布式电源优化与控制。

DPG。I、II类DPG的主要区别如表1所示。

表1 I、II类DPG对比

DPG	I类	II类
电压等级	10 kV	380 V
接入方式	公共电网	用户侧
发电上网模式	全额上网/自发自用余电上网/全部自发自用	全额上网/自发自用余电上网/全部自发自用
补助政策	度电补助	度电补助
安装位置	公共机构、工商业厂房	居民住宅、庭院
投资模式	企业投资	自然人投资
适用容量	≤6 MW	≤0.5 MW
成本比较	运维成本稍高,功率传输损耗低	运维成本较低,经济性受自用比例影响较大

1.2 DPG 经济模型

DPG 收益及成本主要由分布式光伏售电收益、安装成本、运维成本、折旧成本组成,并且I、II类 DPG 有所区别。在文中,I类 DPG 采用全量上网的方式,II类 DPG 采用自发自用余电上网的收益模式,补助政策均采用度电补助的形式。

以I类 DPG 为例,经济模型可用式(1)表示,主要包含年发电量、初始投资、运行成本、总成本现值、总发电现值。

$$\begin{cases} G_{1,y} = P_1 n_1 (1 - \Psi_1)^y \eta_x (1 - \sigma_1) \\ C_1 = P_1 C_1^p \\ O_{1,y} = P_1 O_1^p \\ L_1 = C_1 + \sum_{y=1}^Y \frac{O_{1,y}}{(1+r)^y} - \frac{S_1}{(1+r)^Y} \\ Z_1 = \sum_{y=1}^Y \frac{G_{1,y}}{(1+r)^y} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $G_{1,y}$ 、 $O_{1,y}$ 分别是I类 DPG 在 y 年的发电量和运维费用; C_1 、 L_1 、 Z_1 分别是I类 DPG 投资费用、总成本现值、总发电现值; P_1 、 n_1 分别是I类 DPG 装机容量、峰值日照小时数; y 表示年份($y=0$ 为初始投资年份, $y=1, 2, \dots, Y$), Y 表示项目寿命; C_1^p 、 O_1^p 分别是I类 DPG 单位功率投资费用和运维费用; Ψ_1 是I类 DPG 衰减率; η_x 是系统效率; σ_1 是I类 DPG 线损率; r 是折现率(通常取项目资本成本或社会贴现率); S_1 是I类 DPG 项目结束时设备残值。

II类 DPG 的经济模型与式(1)类似,此处不再赘述。

2 DPG 多目标配置策略

2.1 经济性目标函数

文中经济性目标函数采用平准化度电成本(lev-

elized cost of electricity, LCOE), LCOE 定义为全生命周期内单位发电量的平均成本,考虑I、II类 DPG 结合配置的情况,其计算公式可以表示为:

$$L_{COE} = \frac{L_1 + L_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

式中: L_2 、 Z_2 分别为II类 DPG 的总成本现值、总发电现值。

L_{COE} 越低,表示项目成本越低,收益越大。一般 L_{COE} 需低于当期上网电价,此时项目收益为正。

为方便后文求解,对 L_{COE} 进行无量纲化,定义子目标函数1用式(3)表示:

$$f_1 = \min (L_{COE} / \frac{1}{Y} \sum_{y=1}^Y C_y) \quad (3)$$

式中: C_y 是第 y 年的 DPG 上网电价。

经济性目标函数约束条件如下:

1) LCOE 约束

$$L_{COE} \leq C_y \quad (4)$$

2) 投资约束

$$C_1 + C_2 \leq I_{max} \quad (5)$$

式中: I_{max} 是分布式服务商总投资最大值; C_2 是II类 DPG 投资费用。

3) 线路传输容量约束

$$S_1 \leq S_{1,E} \quad (6)$$

式中: S_1 、 $S_{1,E}$ 为线路1的传输容量、额定传输容量。

2.2 稳定性目标函数

DPG 接入某节点的并网容量越大,则该节点的电压越高。因此,文中主要考虑以 DPG 接入配网后的电压稳定性为目标进行优化。本节参考文献[7],提出了基于配网典型结构的配网线路电压稳定性指标计算数学模型,用以量化 DPG 接入后的配网静态电压分析结果,配网典型结构如图1所示。

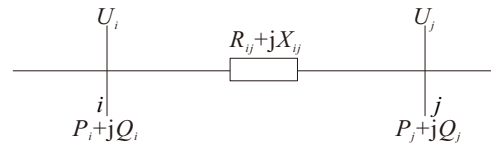


图1 配电网典型线路模型

图1中, U_i 和 U_j 分别表示线路节点 i 、 j 的电压; R_{ij} 、 X_{ij} 分别表示该配网线路的电阻和电抗; P_i 、 Q_i 和 P_j 、 Q_j 分别为节点 i 、 j 线路的有功无功功率。

线路电流(假设电流从节点 i 流向 j)可通过电压、功率进行计算,如式(7)所示:

$$\begin{cases} I_{ij} = \frac{U_i - U_j}{R_{ij} + jX_{ij}} \\ I_{ij} = \frac{P_i - jQ_j}{U_j^*} \end{cases} \quad (7)$$

整理式(7),可得式(8):

$$U_j^4 - (U_i^2 - 2R_{ij}P_j - 2X_{ij}Q_j)U_j^2 + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)(P_j^2 + Q_j^2) = 0 \quad (8)$$

式(8)若存在实数解,则代表节点 j 电压稳定,则其根判别式 ≥ 0 ,并进行简化,可得式(9):

$$U_i^4 - 4(R_{ij}P_j + X_{ij}Q_j)U_i^2 - 4(X_{ij}P_j - R_{ij}Q_j)^2 \geq 0 \quad (9)$$

则支路 ij 的稳定性可表示为:

$$B_{ij} = \frac{4(X_{ij}P_j - R_{ij}Q_j)^2 + 4(R_{ij}P_j + X_{ij}Q_j)^2}{U_i^4} \quad (10)$$

当 $B_{ij} \leq 1$ 时,式(10)有实数解,代表配网静态电压稳定, B_{ij} 越小,则电压稳定性越高。对于包含 b 条支路的配电网,其静态电压稳定指标为:

$$B = \max(B_b) \quad (11)$$

则子目标函数2用式(12)表示:

$$f_2 = \min(B) \quad (12)$$

稳定性目标函数约束条件如下:

1) 功率平衡约束

DPG接入后,配电网内各节点功率应保持平衡。

$$P_{L,t} = P_{EX,t} + P_{PV,t} \quad (13)$$

式中: $P_{L,t}$ 、 $P_{EX,t}$ 、 $P_{PV,t}$ 分别表示 t 时刻配网总负荷、与上级电网交换功率及DPG发电功率。

2) 短路电流约束

$$I_{d,i} \leq I_{d,max} \quad (14)$$

式中: $I_{d,i}$ 、 $I_{d,max}$ 分别是节点 i 的短路电流值、短路电流最大限值。

3) 节点电压约束

根据《电能质量 供电电压偏差》(GB/T 12325—2008)的要求,DPG并网后节点电压的变化范围为-7%~+7%,可用式(15)表示:

$$0.93U_N \leq U_i \leq 1.07U_N \quad (15)$$

式中: U_N 是电压额定值。

4) DPG的出力约束

$$P_{PV,i} \leq S_{PV,i}^{\max} \quad (16)$$

式中: $P_{PV,i}$ 是节点 i 接入DPG后发电功率; $S_{PV,i}^{\max}$ 是节点 i 的最大可接容量,通常受台区配变容量、线路承载力限制。

综合目标函数可以表示为:

$$F = \min(\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) \quad (17)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为目标函数权重系数, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

3 微分-细胞膜算法

细胞膜算法全局寻优能力较强,但全局最优解搜索能力不足,且易因初值选取不当而陷入局部最优并早熟的情况。文中参考微分进化思想,形成新的微分-细胞膜算法。

在每次迭代开始之前,对第 g 代物质进行变异、交叉,利用精英政策,按照目标函数值进行筛选,将其分为高浓度、低浓度物质,并采取相应策略进行寻优。通过以上操作,增强算法的鲁棒性,保证了搜索的丰富性,避免早熟。具体步骤如下:

1) 假设初始化物质群中有 s 个 x 维的物质,每个物质通过差分操作实现变异,在物质群中随机选取不同两个物质,将其向量操作后与待变异个体进行合并生成中间体,如式(18):

$$v_h(g+1) = x_{r1}(g) + F_1(x_{r2}(g) - x_{r3}(g)) \quad (18)$$

式中: $h \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3$; $F_1 \in [0,2]$ 为缩放因子; $v_h(g+1)$ 为变异产生的第 $g+1$ 代种群的第 h 个变异物质。

在变异过程中必须保证生成的变异个体符合目标函数的边界条件,否则重新生成变异个体。

2) 对物质进行交叉操作:

$$\begin{cases} u_h^q(g+1) = v_h^q(g+1), \text{rand}(0,1) \leq CR \\ u_h^q(g+1) = x_h^q(g+1), \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $CR \in [0,1]$ 为交叉因子; $\text{rand}(0,1)$ 为 $[0,1]$ 之间的随机数; $x_h^q(g+1)$ 表示第 $g+1$ 代第 h 个物质的 q 维元素; $u_h^q(g+1)$ 为交叉产生的第 $g+1$ 代第 h 个交叉物质的 q 维元素。

3) 利用精英策略选取最优物质进入下一次迭代,以求解目标函数最小值为例:

$$\begin{cases} x_h(g+1) = u_h(g+1), f(u_h(g+1)) \leq f(x_h(g)) \\ x_h(g+1) = x_h(g), \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

在交叉变异操作之后,按照细胞膜算法原则将其分为高浓度和低浓度物质,然后按照不同的运动方式寻优,流程如图2所示。

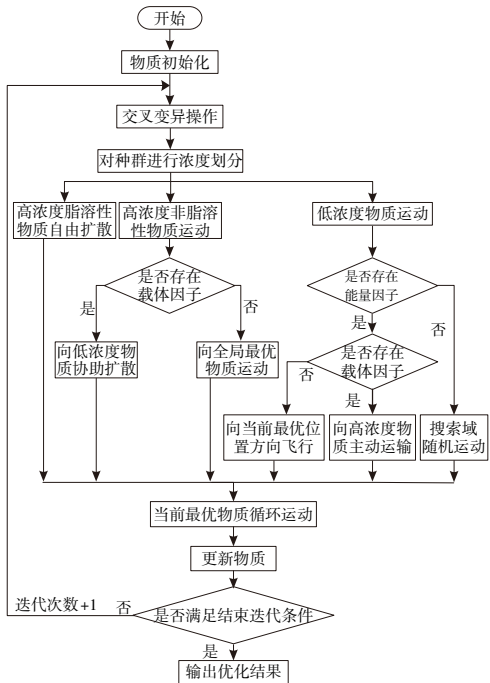


图2 微分-细胞膜算流程图

4 算例分析

4.1 算例参数

文中算例采用IEEE14节点系统配电网来验证所提DPG配置策略的有效性,配网结构如图3所示,图中蓝色数字代表支路编号,DPG可接入位置为节点3、4、7、14。分时电价如表2所示,DPG参数如表3所示。投资限额为1000万元,上网电价为0.4元/kWh,贴现率6%,II类DPG的余电上网比例为70%,线路额定传输容量为400A,权重 λ_1 、 λ_2 分别为0.42、0.58。

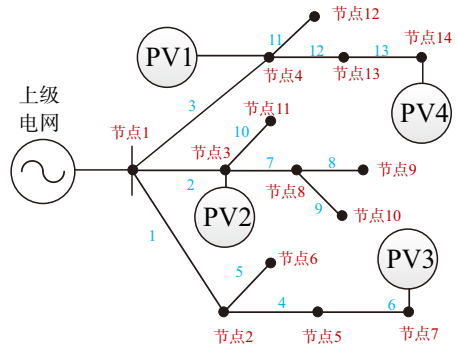


图3 IEEE14节点配电网

表2 电网电价

时段	具体时间	价格(元/kWh)
峰时段	17:00—23:00	0.96
平时段	06:00—17:00	0.60
谷时段	23:00—06:00	0.36

表3 I、II类DPG参数

参数	I类	II类
年峰值日照小时数(小时)	1 050	950
安装成本(万元/kW)	0.35	0.3
年运维成本(元/kW)	45	35
项目寿命(年)	25	20
年衰减率(%)	0.5	0.6
线损率(%)	3	1
项目残值(万元/kW)	0.04	0.05

为验证文中所提分布式光伏配置策略的有效性,建立了两种场景,对优化结果进行对比分析。

- Case 1:容量固定配置策略(满足约束条件);
- Case 2:文中所提配置策略。

4.2 算例结果及分析

经过文中所提策略优化后,表4为Case1、Case2的容量配置情况。

表4 DPG容量配置

场景	Case1		Case2	
	I类	II类	I类	II类
PV1	0	500	0	400
PV2	1 000	0	800	0
PV3	1 000	0	1 000	0
PV4	0	500	700	0

由表4分析可得,在投资限制下,相较于Case1,Case2提升了I类 DPG 配置容量 500 kW,降低了II类 DPG 配置容量 600 kW;从位置分析,提升了末端节点7、14的DPG配置容量,降低了靠近上级电网节点3、4的配置容量。主要原因为I类 DPG 年峰值日照小时数较大,且在节点末端接入 DPG 可显著提升末端节点电压。

表5为两种场景下目标函数值,图4、5分别为各支路静态电压稳定性指标和各节点电压。从表5中可看出,相较于Case1场景,Case2的LCOE下降了0.27元/kWh,同比下降8.05%,此外,静态电压稳定性指标下降了0.11,下降幅度为6.01%,验证了文中所提策略在降低发电成本、提高电网电压稳定性方面的有效性。进一步结合图4、5分析,相较于Case1,经过文中所提 DPG 容量优化配置后,Case2各支路的静态电压稳定性指标均有不同程度的下降,并且节点电压的控制效果较好。

表5 目标函数值

场景	Case1	Case2
LCOE	0.335	0.308
静态电压稳定指标	0.183	0.172

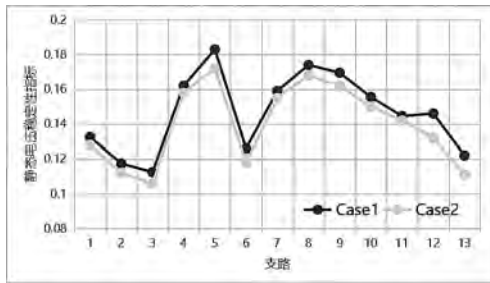


图4 支路静态电压稳定性指标

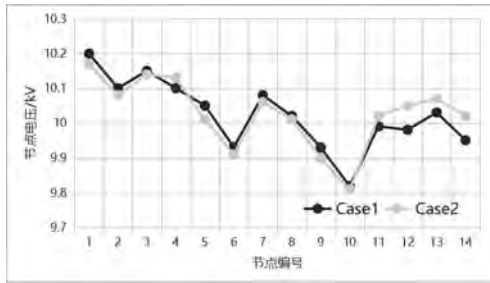


图5 各节点电压

为验证文中 DPG 配置策略在不同网架结构中的有效性,选用 IEEE 33 节点配电网络进行测试,评估结果如表 6 所示。

表6 IEEE 33 节点目标函数值

场景	Case1	Case2
LCOE	0.341	0.310
静态电压稳定指标	0.225	0.194

结合表 5 和表 6 分析,网络节点的增加导致其电压的控制难度增加,随机性增强,与 IEEE 14 节点系统相比,Case1 和 Case2 的 LCOE 指标无明显变化,但静态电压稳定指标同比上升了 22.95%、12.79%,证明文中的控制策略对电压的稳定控制更好。

此外,文中将微分-细胞膜算法与遗传算法、粒子群算法的收敛性能进行对比,结果如表 7 所示。可以看出,微分-细胞膜算法的寻优能力及收敛能力均强于另外两种算法,虽然遗传算法的迭代次数最低,但是陷入局部最优。因此,文中所提算法在解决该类优化问题时具备一定的先进性。

表7 IEEE 33 节点目标函数值

算法	目标函数值	迭代次数
遗传算法	0.896	15
粒子群算法	0.915	20
微分-细胞膜算法	0.952	16

文中考虑电价因素影响,设定工商业深谷电价时段为 12:00-14:00,深谷电价取 0.3 元/kWh,两种场景下目标函数值如表 8 所示。对比表 5,目标函数值无显著变化,证明电价因素影响对调度策略影响不大。

表8 目标函数值

场景	Case1	Case2
LCOE	0.337	0.309
静态电压稳定指标	0.188	0.175

5 结语

文中提出了一种综合考虑 DPG 投资经济性与电网稳定性的容量配置策略,基于 IEEE14 节点配电网络,利用微分-细胞膜算法,对所提优化模型进行求解,得出以下结论:

1) 在一定投资限制下,相较于固定容量配置法,文中策略可显著降低 DPG 全生命周期发电成本,极大地提升 DPG 的投资经济性。

2) 在提升 DPG 投资经济性的同时,通过电网电压稳定性优化,能有效提高电网静态电压稳定性指标,同时兼顾光伏用户侧、电网侧利益诉求。

3) 文中对比了不同网架结构和不同算法寻优场景下的优化结果,证明了所提控制策略可有效应对网架结构变化,算法具备一定的先进性,电价对优化结果影响较小。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 全国一季度可再生能源并网运行情况[EB/OL]. (2025-04-28) [2025-08-10]. <https://www.nea.gov.cn/20250428/4b2dff7ab84347df9a068f8e972f4775/c.html>
- [2] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[R]. 北京:国家能源局,2023.
- [3] 项佳宇,王晓冰,李冰,等. 考虑灵活性资源配置的配电网光伏承载力评估方法[J]. 电测与仪表,2025,62(02):143-153.
- [4] 林沛昕. 面向园区最优用能的分布式光伏及储能容量配置方法[J]. 东北电力大学学报,2024,44(05):50-56.
- [5] 门茂琛,赵睿,张金帅,等. 基于改进模拟退火-粒子群的配电网分布式光伏承载力评估[J]. 浙江大学学报(工学版),2024,58(06):1255-1265.
- [6] 国家能源局. 国家能源局关于印发《分布式光伏发电开发建设管理办法》的通知[EB/OL]. (2025-01-17)[2025-08-10]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11946/202503/content_7015853.html.
- [7] 熊伟鹏. 高比例分布式电源接入配电网静态电压稳定性分析[J]. 江西电力,2024,48(04):11-15.