[并网]

高渗透新能源接入下配电网承载容量计算及提升方法

文/闵鹏[1] 张瀚文[2] 林锋[1] 赵宇辉[1]
1. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司；2. 兴发集团能兴售电有限公司

针对高比例可再生能源并网对配电网的影响，提出考虑电能质量、继电保护及设备热稳定性的承载能力评估模型，并构建含储能协同优化的双层规划方法。采用改进粒子群优化(PSO)算法求解模型，通过45节点系统验证表明，储能配置可使新能源托管容量增长21.86%，为新型电力系统规划提供量化决策支撑。

随着工业的发展，CO_2排放已经成为制约社会发展的全球性问题，电力能源行业是碳排放的重要主体，规划可再生能源并网已成为必然趋势。然而，分布式风机和光伏功率易受环境气候影响，会改变潮流分布，威胁电能质量与电力系统的安全稳定运行。因此，在配电网规划新能源前，计算其新能源承载能力十分必要。配电网内托管容量，即接入容量限制，在近期各国际组织的重要报告中多次被提及，大多数文献将其定义为不违反电力系统技术指标时，可接入电网的新能源最大容量限制值。电力行业可再生能源承载能力评估的研究起步较早。许多绿色能源，包括太阳能、风能、水力发电和甲烷，都接入了配电网。文献[1]将静态电压指标作为技术极限进行评价，分别以主机容量最大化和电压偏差约束的满足为上、下两层的优化目标，建立两层优化模型进行计算。文献[2]将继电保护作为承载容量评估的技术约束，提出的评估方法包括配电网保护动作和故障电流的影响。文献[3]将相间短路电流作为评价新能源托管容量的约束条件，并建立相应的两级优化模型进行求解。文献[4]考虑谐波约束来评估新能源承载能力。通过分析可再生能源接入电力系统后的谐波电流注入机理，确定可再生能源接入后各谐波所对应的约束条件，实现对新能源承载能力的评估。文献[5]采用故障定位作为限制新能源承载能力评估的条件，区分原有市电提供的最小短路电流和新能源提供的最大短路电流，保证传统的故障定位系统仍然可用。邹赫等提出将电压波动引入托管容量评估的约束条件。通过给出电压波动的近似计算公式，在新能源接入后，无须模拟即可得到各节点新能源产生的电压波动。Volvos PN等提出一种基于最优流模型分析能量接入容量的新方法，并通过具体电网实例验证该方法的合理性和有效性。然而，这些模型将新增电力和电网负荷视为单一值，忽略新增电力和用户负荷的变化。

上述文献往往只考虑单一指标约束的变化，而没有综合考虑电能质量、热稳定性、短路电流等主机容量评价指标。由于新电力系统新能源承载能力评估是非线性的，模型相对复杂，求解需要更多的时间和计算能力。

综上所述，本文建立综合考虑电能质量、继电保护和热稳定性约束的托管容量计算模型。考虑到模型中存在大量的非线性约束，PSO对模型进行求解，并发挥能量的作用，存储在提高托管容量方面的作用。考虑到大量的非线性约束，采用PSO算法来解决这一问题，并研究储能对提高配电网承载能力的作用。

配电网新能源容量计算模型

需要在保证配电网安全稳定的前提下，对配电网的托管容量进行计算。本文以新能源最大装机容量为目标函数，考虑的约束条件包括潮流约束、电压偏差约束、热稳定约束、电压波动约束、短路电流约束以及配电网的区域资源禀赋约束。图1为托管容量计算模型。

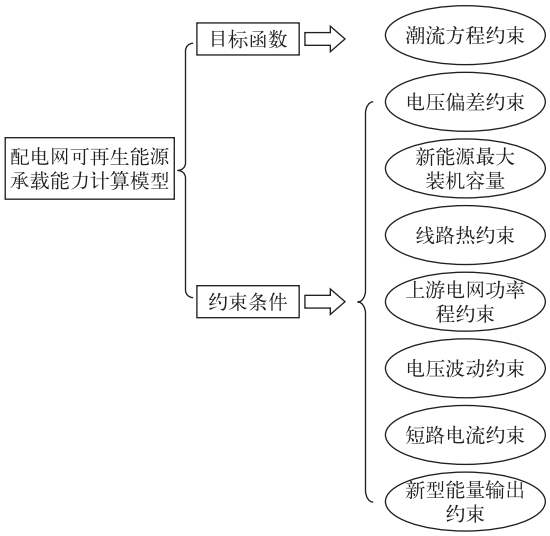

图1　托管容量计算模型

1. 目标函数

在配电网中，新能源往往不是单点接入，而是存在多个接入节点。假设所有分布式新能源的功率因数相等，新能源的托管能力为

$$F=\max\left(\sum_{i=1}^{N}S_{\mathrm{NE},i}\right) \tag{1}$$

式中，N为待评估网络节点总数；$S_{\mathrm{NE},i}$为节点i的可再生能源容量。

各新能源的有功出力、无功出力与装机容量的关系为

$$\begin{cases}P_{\mathrm{NE},i}=S_{\mathrm{NE},i}\cos\varphi_i\\Q_{\mathrm{NE},i}=S_{\mathrm{NE},i}\sin\varphi_i\end{cases} \tag{2}$$

式中，$P_{\mathrm{NE},i}$、$Q_{\mathrm{NE},i}$分别为节点i处新能源的有功出力和无功出力；φ_i为节点i的新能源功率因数，由于在评价可再生能源承载能力时需要检测最坏条件下的约束满足情况，故此处的可再生能源输出为根据装机容量计算出的最大可能输出。

2. 约束条件

本文提出的配电网可再生能源承载容量模型综合考虑潮流约束、热稳定性约束、电能质量约束和继电保护约束等因素。

（1）潮流约束

功率潮流方程可以用来约束电网正常运行下最基本的功率平衡，即

$$\begin{cases}P_{\mathrm{NE},i}-P_{Lj}-U_i\sum\limits_{j\in\Omega_N}U_j(G_{ij}\cos\delta_{ij}+B_{ij}\sin\delta_{ij})=0\\Q_{\mathrm{NE},i}-Q_{Lj}-U_i\sum\limits_{j\in\Omega_N}U_j(G_{ij}\sin\delta_{ij}+B_{ij}\cos\delta_{ij})=0\end{cases} \tag{3}$$

式中，$P_{L,i}$，$Q_{L,i}$分别为节点i负载的有功功率和无功功率；G_{ij}，B_{ij}和δ_{ij}分别为节点和i之间的电导、电纳和电压相位差；节点j分别为Ω_N为系统中所有节点的集合；U_i为节点i的电压幅值。

（2）电压偏差约束

可再生能源大规模接入配电网，导致配电网电压发生变化，甚至电压超过规定限值。电压偏差限值可表示为

$$(1-\varepsilon_L)U_N\leqslant U_i\leqslant(1+\varepsilon_H)U_N \tag{4}$$

式中，U_N为待评估电网标称电压；ε_L和ε_H分别为国家标准规定的电压偏差上限和下限。

（3）电压波动约束

电压波动是电压有效值的一系列变化。有必要对电压波动进行限制。新能源输出的随机性会在短时间内造成电网电压的一定波动。为保证电能质量，电压波动不应超过允许的最大波动。电压波动的约束为

$$d_i\leqslant d_{\max} \tag{5}$$

式中，d_i为对应运行方式下节点电压波动的百分比值；$d_{\max}$为技术导则规定的电压波动的最大允许值。

光伏与风电并网时的电压波动总结为

$$d_{\mathrm{pv},k}=\frac{\lambda_p\sum\limits_{i=0}^{k}\left[R_i\sum\limits_{j=i}^{n}P_{\mathrm{PV},j}+Xi\sum\limits_{j=i}^{n}Q_{\mathrm{PV},j}\right]}{V_N^{\,2}}\times100\% \tag{6}$$

式中，$d_{\mathrm{pv},k}$为光伏引起的节点k处电压波动；λ_P为受自然条件影响的新能源瞬时功率变化幅度与其额定输出功率的比例；$P_{\mathrm{PV},j}$和$Q_{\mathrm{PV},j}$分别表示节点j处光伏输出的有功功率和无功功率。

设分布式风机受外界风速、风向等因素影响的瞬时功率变化幅值与其额定功率之比为λ_w。恒功

率控制模式下，新能源风机引起的电压波动计算公式为

$$d_{w,k}=\frac{\lambda_w\sum_{i=0}^{k}\left[R_i\sum_{j=i}^{n}P_{\mathrm{win},j}+X_i\sum_{j=i}^{n}Q_{\mathrm{win},j}\right]}{V_N^{\ 2}}\times100\% \tag{7}$$

式中，$P_{win,j}$和$Q_{win,j}$分别表示节点j处风电的有功功率和无功功率。

（4）短路电流约束

考虑新能源的电网短路电流需要满足公式所示的约束条件

$$I_{D,i}\leqslant I_{D,\max} \tag{8}$$

式中，$I_{D,i}$为节点i的短路电流；$I_{D,\max}$为技术导则规定的短路电流最大允许值。

电力行业推荐标准DL/T5729—2016《配电网规划设计技术导则》从配电网规划的角度规定了各种电压等级的短路电流限值，见表1。

表1　各电压等级的短路限流

电压等级/kV	短路电流限制（K_a）		
	电源区域A+、A、BC类	C 类电源区域	E、D类电源区域
110	40	40	31.5.40
66	31.5	31.5	31.5
35	31.5	25,31.5	25,31.5
10	20,25	16,20	16,20

（5）新能源处理约束

可再生能源托管容量计算涉及诸多约束，其中包含大量非线性约束，托管容量计算模型复杂，需要进行大量的简化，影响求解准确度。因此，可以使用PSO来处理这个问题。利用PSO求解可再生能源托管容量的流程图如图2所示。

将储能接入配电网，增加托管容量

储能作为电力系统中的一种柔性资源，可以极大地提高电网的弹性，维护电网的安全稳定运行。本文考察储能接入配电网后，储能对可再生能源承载能力的影响。

本文考虑的储能为功率型，储能系统的响应时间可以忽略不计。考虑到储能的全生命周期，一天储能采用两次充电两次放电的控制策略。本文假设储能在充放电过程中的功率是稳定不变的。因此，可以将储能视为充电时的负载节点和放电时的功率节点。

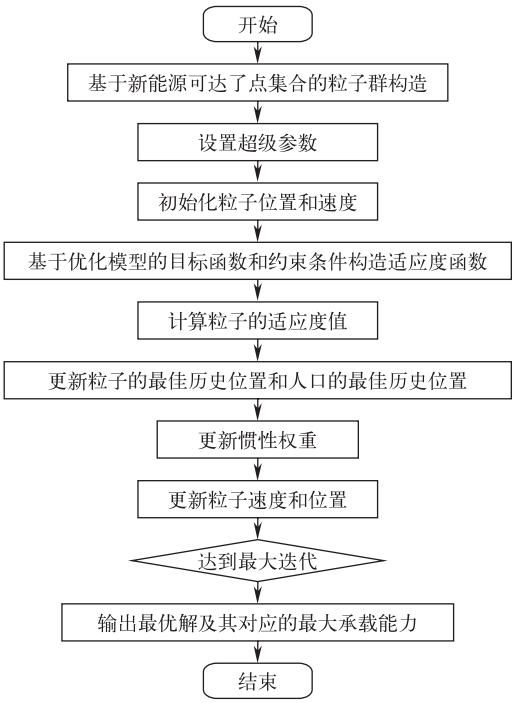

图2　托管容量计算流程图

示例分析

1. 示例数据分析

采用10 kV双馈线径向配电网计算电网的承载能力。配电网的网络拓扑结构如图4所示。配电网包含4个风电并网节点，即节点2、节点7、节点11、节点15，以及4个光伏并网节点，即节点19、节点22、节点30和节点40。配电网总有功功率为11.54 MW，总无功功率为5.15 Mvar。节点和线路参数均为参考。配电网拓扑图如图3所示。

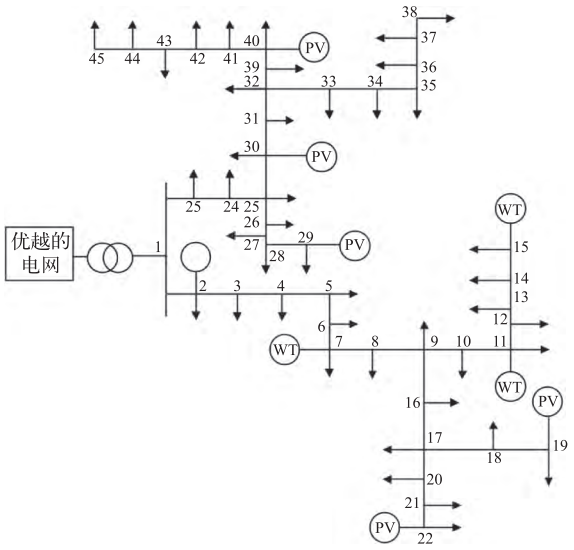

图3　配电网拓扑图

2. 储能接入前配电网托管容量分析

根据配电网区域的资源禀赋条件，将本文中可再生能源的最大并网功率设为5 MW，将新能源的功率因数设为0.95。对托管容量指标进行分析。各新能源并网节点的新能源托管容量和最大新能源连接容量见表2。

表2 节点新能源托管容量和最大并网容量

新能源托管容量/（kV·A）	各接入节点新能源最大并网容量		
	新能源接入节点号	新能源最大并网功率/kW	新能源最大并网容量/（kV·A）
20 269.47	2	2 729	2 872.63
	7	1 354	1 425.26
	11	3 268	3 440
	15	3 544	3 730.53
	19	0	0
	22	1 008	1 061.05
	29	3 034	3 193.68
	30	2 051	2 158.95
	40	2 693	2 834.74

（1）电压偏差分析

接入新能源使配电网节点电压升高。新能源接入越靠近线路末端，新能源提升电压的作用就越明显。也就是说，节点越靠近线路末端，新能源的最大接入功率越小。

（2）电压波动分析

根据表2的电网功率接入新能源后，节点电压波动情况如图4所示。

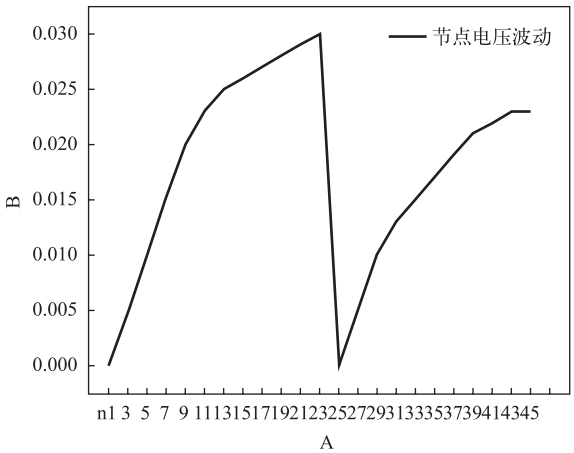

图4 电压波动分析

从图4的分析可以看出，配电网的供电线路接入的可再生能源越多，电压波动越大，靠近供电线路末端的节点电压波动受到新能源的影响。

（3）短路电流分析

当新能源按照表2所示的并网功率并网时，计算三相短路后节点的短路电流，并与新能源并网前节点的短路电流进行对比。对比结果如图5所示。

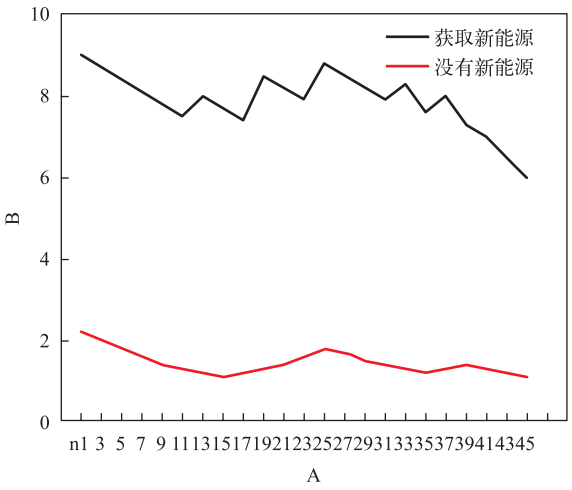

图5 节点短路电流对比图

从以上计算结果可以看出，新能源的连接会导致节点短路电流增大。由于节点1连接的是电压稳定性较强的变压器，因此该节点的短路电流最大。

3. 储能接入后配电网承载能力分析

储能系统分别在19、22、29节点接入。每个储能系统的功率为1 500 kW，能量为3 000 kW·h。考虑到储能的使用寿命，储能采用两次充电、两次放电的策略。在新能源输出的高峰期进行储能和充电，在新能源发电的低谷期进行放电，以保持电网的安全稳定。接入储能后配电网的托管能力见表3。

表3 储能后节点新能源托管容量和最大并网容量

新能源托管容量/（kV·A）	各接入节点新能源最大并网容量		
	能源接入节点号	新能源最大并网功率/kW	新能源最大并网容量/(kV·A)
24 700	2	5 000	5 263.16
	7	3 542	3 728.42
	11	888	934.74
	15	0	0
	19	1 471	1 548.42
	22	1 661	1 748.42
	29	2 738	2 882.11
	30	5 000	5 263.16
	40	3 165	3 331.58

储能并网后，新能源托管容量增长了21.86%。储能系统可以很好地应对新能源的波动，维护系统

的安全稳定，提高电网的韧性。

结束语

接入新能源不仅会增加节点电压，导致节点电压波动等电能质量问题，还会导致继电保护问题和热稳定性问题，如线路短路电流上升等。本文建立配电网新能源承载能力的计算模型，并利用粒子群优化算法对配电网新能源承载能力进行计算和分析。研究发现，越靠近线路末端的节点越容易违反系统安全性和稳定性限制。配电网接入储能后，系统的可调容量增大。接入配电网的储能，可以有效提高配电网的托管能力。**EA**

（收稿日期：2025-05-23）

参考文献

[1] 杨旭英，段建东，杨文宇，等．含分布式发电的配电网潮流计算[J]．电网技术，2009，33(18)：139-143．

[2] 胡海兵，吴思，夏翔，等．计及电压调整约束的多分布式电源接入配电网最大穿透功率计算[J]．中国电机工程学报，2006，26(19)：13-17．

[3] 雷娟，黄伟，夏翔，等．计及相间短路故障的分布式电源穿透功率极限计算[J]．电力系统自动化，2008．

[4] 钟清，高翔，于娜，等．主动配电网谐波约束下分布式电源接纳能力及方式[J]．电力系统自动化，2014(24)：108-113．

[5] 高孟友．智能配电网分布式馈线自动化技术[D]．济南：山东大学，2016．

（上接第69页）

结束语

本文针对利用分布式光伏逆变器冗余容量进行无功优化问题展开研究，建立以系统网络损耗率最小为优化目标的无功优化模型，结合Levy飞行、非线性惯性权重更新提出一种改进粒子群算法对优化模型进行求解，并通过现实中的孤东采油厂油田线路进行仿真验证。结果表明，改进的粒子群算法拥有更快的全局寻优能力和更高效搜索效率；考虑光伏无功输出能力进行线路优化，能够在光伏有功出力的基础上进一步降低系统网损率，提高能源的利用率。**EA**

（收稿日期：2025-04-10）

参考文献

[1] 李安乐，田晶京，赵峰，等．含光伏电源的配电网潮流计算[J]．电测与仪表，2020，57(10)：58-63．

[2] 喻恒凝，黄力，张思东，等．分布式光伏和电动汽车接入对配电网网损和电压偏移影响的分析研究[J]．智慧电力，2020，48(1)：28-34．

[3] 庄园，王磊．分布式电源在配电网络中优化选址与定容的研究[J]．电力系统保护与控制，2012，40(20)：73-78．

[4] 徐渊．改进粒子群算法在含分布式电源配电网优化重构中的应用[J]．电测与仪表，2021，58(3)：98-104．

[5] 章力，高元海，熊宁，等．考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]．电力系统自动化，2014，38(17)：43-48．

[6] 刘梦，杨作梁．考虑网架结构和分布式电源的主动配电系统双层规划[J]．电测与仪表，2018，55(14)：46-50，81．