

DOI: 10.7667/PSPC171142

# 一种矩阵化描述的分布式光伏准入容量计算方法

商立群, 郭伟

(西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对配电网大面积接入分布式光伏的准入容量计算问题, 考虑电压稳定和区域太阳光能量的分布, 首先分析了分布式光伏接入对配电网的影响。然后用自定义矩阵导出电压约束, 提出一种矩阵化描述的准入容量计算方法, 避免在应用电压约束进行准入容量计算时的潮流迭代问题。采用通用的数据结构和矩阵化的描述, 便于计算规模的扩展。采用遗传算法计算各节点准入容量, 得出以电压为约束的准入容量值。最后以 IEEE11 节点系统为例对提出的方法进行了仿真计算, 分别得到分布式光伏无额外限制接入、按距离均匀分布接入和按节点均匀分布接入三种情景的准入容量, 进而提出适用于大面积分布式光伏接入配电网的原则。

**关键词:** 配电网; 分布式光伏; 准入容量; 矩阵化算法

## A matrix description method for calculating the distribution photovoltaic penetration level of distribution network

SHANG Liqun, GUO Wei

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To solve the problem of penetration level calculation when a wide range of distributed photovoltaic (PV) is connected to distribution network, the influence of the distributed PV integration on the distribution network is analyzed firstly considering voltage stability and regional solar energy distribution. Then voltage constraints are deduced using custom matrix, and a penetration level calculation method based on matrix description is proposed to avoid flow iteration when uses voltage constraints to calculate penetration level. Generic data structure and matrix description are adopted to extend the calculation scale conveniently. Genetic algorithm is used to calculate the specific penetration level of each node and the penetration level value based on constrained voltage is got. Finally, taking the IEEE11 node system as an example, the proposed method is simulated and calculated. The penetration levels of the three scenarios, i.e. distributed PV access without considering extra restriction, evenly distributed access based on distance and evenly distributed based on nodes are obtained respectively, thus proposing ways suitable for large-area distributed PV access.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777166) and Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province (No. 2014JM2-5077).

**Key words:** distribution network; distributed photovoltaic; penetration level; matrix algorithm

## 0 引言

推进分布式光伏发展和“光伏+”应用是新能源发展的重点任务<sup>[1]</sup>。分布式光伏接入的首要问题是准入容量<sup>[2-5]</sup>的界定。国家能源局规定单个用户系统准入容量为 5 kW 左右, 单个村级电站准入容量一般不超过 300 kW<sup>[1]</sup>。全国情况各异, 应因地制宜调整容量限制。分布式光伏保守接入会造成太阳能资源浪费, 乐观接入则会造成光伏设备利用率不足

和系统稳定隐患, 因此有必要对分布式光伏准入容量计算进行研究<sup>[6-7]</sup>。

目前光伏准入容量计算方法大致分三类: 试探法、频率静态特性法和带约束的最优化方法<sup>[8]</sup>。约束条件有电压质量、相间短路、谐波指标、继电保护、供电可靠性、有功损耗、潮流分布等系统运行指标<sup>[9]</sup>。在以电压质量为约束的准入容量计算方法中, 电压多以潮流迭代<sup>[10-15]</sup>得到, 计算较为复杂。

本文针对配电网分布式光伏准入容量计算问题, 以电压质量为约束条件, 将配网拓扑采用矩阵描述, 利用自定义矩阵导出电压约束, 避免了潮流迭代, 采用遗传算法为计算工具计算准入容量; 利

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777166); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2014JM2-5077)

用 IEEE11 节点系统对算法进行校验。准入容量计算结果可以对配电网大规模分布式光伏接入提供依据。

### 1 分布式光伏对配电网电压影响

负荷的不可控与分布式光伏的不可调度,使叠加后潮流的不确定性、间歇性、随机波动性和动态变化的特点更明显,对系统的扰动更大。扰动最直接影响反映在电压质量上。

单电源辐射型低压配电网中,馈线末端电压低于首端电压。将配电网等效为节点,负荷和分布式光伏分别等效为节点的流出功率和注入功率,分布式光伏的接入等效于负荷减小。以配电网总负荷  $S_L$  和分布式光伏总的准入容量  $S_D$  做对比,通过定性分析得出分布式光伏对配网电压的影响,如表1所示。

表 1 分布式光伏对配电网潮流的影响

Table 1 Influence of distributed PV on power flow in distribution network

情景	对各节点电压的影响	潮流状态
$S_D < S_L$	电压上升	功率流向负荷
$S_D = S_L$	电压上升	少量功率流动
$S_D > S_L$	电压上升	功率反向

由表 1 可以得出,准入容量最大情景为潮流倒送而各节点电压不越限。

### 2 含分布式光伏的配电网建模

#### 2.1 假设

针对低压配电网分析,基于以下假设:

- 1) 配电系统三相平衡;
- 2) 拓扑结构为辐射式;
- 3) 保护装置允许潮流倒送;
- 4) 忽略相间电磁耦合;
- 5) 分布式光伏用负的负荷等效;
- 6) 光伏单元功率因数近似为1;
- 7) 电网用无穷大电源等效,电压幅值为 $1.05U_N$ ;
- 8) 无功就地补偿,线路只传输有功功率。

#### 2.2 配电网模型及拓扑描述

基于以上假设,可将含分布式光伏的配网进行简化,得到图1所示的配电网模型。

图1中, System 为等效系统侧的无穷大电源; bus<sub>1</sub> 为配电网母线1;  $U_1$  为系统侧额定电压;  $R_2 + jX_2$  为线路2的阻抗;  $\Delta S_2$  为线路2的线损;  $S_2$  为线路2流出的功率;  $S_{L,2}$  为母线2处接入的负荷容量;  $S_{D,2}$  为母线2处接入的分布式光伏容量。

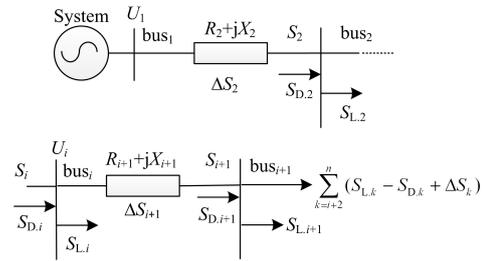


图 1 含分布式光伏的配电网模型

Fig. 1 Distributed photovoltaic power network model

基于图论对图 1 进行简化,得到图 2 所示模型。



图 2 基于图论的配电网模型

Fig. 2 Model of distribution network based on graph theory

图2中, ● 为母线节点; — 为母线间支路。进一步将单电源辐射型配网扩展为树状结构,如图3所示。

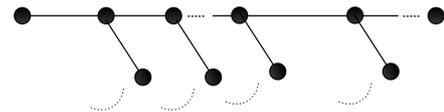


图 3 单电源辐射树状配电网结构

Fig. 3 Tree structure of single source radiation distribution network

树中末端母线等效节点称为叶子节点。从配网首端至叶子节点间的一条通路称为一条完整路径。假定单电源辐射型配电网对应的树中有  $n$  个节点,  $b$  条支路,  $l$  个叶子节点。存在如下关系:  $b = n - 1$ ,  $l$  个叶子结点对应完整路径的条数。树中节点采用循序编号方式,支路编号以及后续各个矩阵的编号跟随节点号。

对配电网的图论化表示有利于对电网结构拓扑的矩阵化描述。矩阵描述的配电网使算法更便于程序化和配电网规模的扩展。

#### 2.3 基于图论的网络拓扑模型

借鉴 PSD-BPA 程序对网络拓扑的描述,并作一定的简化,得到配网拓扑参数矩阵,如式(1)所示。

$$S = [F_{bus} \quad T_{bus} \quad R \quad X] \quad (1)$$

式中:  $F_{bus}$  为支路的首节点号列向量;  $T_{bus}$  为支路的尾节点号列向量;  $R$  为支路电阻列向量;  $X$  为支路电抗列向量。

矩阵形式的网络拓扑描述,有利于网络拓扑规模和复杂程度的扩展以及后续算法的矩阵化实现。为便于矩阵计算,定义辅助矩阵  $A[a_{ij}]$ ,  $i \in n, j \in n$ ,  $n$  为总节点数。 $a_{ij}$  定义如下:

- 1) 若结点  $i, j$  间有支路, 则  $a_{ij}=1$ ;
- 2) 若结点  $i, j$  间无支路, 则  $a_{ij}=0$ ;
- 3) 默认对角线元素为1, 则  $a_{ii}=1$ 。

在矩阵  $A$  中, 元素  $a_{ij}$  和  $a_{ji}$  为对同一条支路的重复描述, 导致矩阵  $A$  出现冗余。两个元素分别在矩阵  $A$  中的上三角阵和下三角阵中, 运算时以去掉下三角阵的方式实现矩阵去冗余。为表述方便, 去冗余后的辅助矩阵依然采用符号  $A$ 。

定义描述经过支路的完整路径矩阵  $R[r_{ij}]_{l \times n}$ ,  $i \in l, j \in n$ 。  $l$  为叶子节点数,  $n$  为支路标号。  $r_{ij}$  定义如下:

- 1) 第  $i$  条完整路径有  $j$  支路, 则  $r_{ij}=1$ ;
- 2) 第  $i$  条完整路径无  $j$  支路, 则  $r_{ij}=0$ 。

拓扑结构决定唯一矩阵  $A$  中元素, 矩阵  $A$  中元素确定唯一拓扑结构, 两者互为充要条件。拓扑关系中包含叶子节点个数  $l$  和完整路径中所经过的支路。所以, 可由矩阵  $A$  导出  $l$  和  $R$  矩阵。

计算过程如下。

- 1) 叶子节点的数目  $l$  和位置的确定

配网拓扑中仅首节点和叶子节点出现了一次, 对应到矩阵  $A$  中, 将矩阵  $A$  中对角元素置零并按行求和, 和矩阵中只有叶子节点位置处的元素为1。由此确定叶节点的个数和位置, 确定完整路径数目和末端电压的位置。

- 2) 完整路径矩阵元素确定

$a_{ij}$  下标  $i, j$  为支路端点, 利用该特点, 完整路径的搜索采用倒序阶梯路线搜索的方式, 依脚标从叶子节点逐级向上至首节点。搜索循环次数为叶子节点数, 搜索终止标志为遇到首节点。

### 3 基于矩阵 $A$ 的电压降落矩阵描述

准入容量用含  $n$  个元素的光伏准入容量矩阵  $P_v$  表示, 每个元素代表各个节点的准入容量值。光伏准入容量矩阵叠加负荷有功功率矩阵  $P_L$  得到节点净注入有功功率矩阵  $P$ 。末端电压幅值可用节点净注入有功功率矩阵和配电网拓扑参数矩阵描述。最终, 将分布式光伏准入容量问题转化为以电压不越限、各节点准入容量之和最大的多变量最优化问题。

算法矩阵实现的基础是网络拓扑矩阵和电气量矩阵。网络拓扑结构矩阵包括已经定义的配网拓扑参数矩阵  $S$ 、辅助矩阵  $A$  和完整路径矩阵  $R$ 。电气量矩阵包括节点净注入有功矩阵  $P$ 、支路传输功率矩阵  $P_T$ 、支路压降矩阵、完整路径压降矩阵。可用支路压降矩阵和完整路径矩阵推导出完整路径的电压降落, 最终得出各叶子节点电压, 作为电压约束

条件。

分布式光伏以单位功率因数运行, 负荷无功功率以及无功功率损耗均采用动态就地补偿, 因此只定义有功功率矩阵。

定义负荷有功功率矩阵,

$$P_L = [P_{L1} P_{L2} \cdots P_{Li} \cdots P_{Ln}] \quad (2)$$

式中,  $P_{Li}$  为第  $i$  个节点的有功负荷,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

定义光伏准入容量矩阵,

$$P_V = [P_{V1} P_{V2} \cdots P_{Vi} \cdots P_{Vn}] \quad (3)$$

式中,  $P_{Vi}$  为第  $n$  个节点分布式光伏准入容量,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

定义节点净注入有功矩阵为

$$P = [P_1 P_2 \cdots P_i \cdots P_n] \quad (4)$$

式中,  $P_i$  为第  $i$  个节点的有功负荷,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

由式(5)确定。

$$P = P_V - P_L \quad (5)$$

节点净注入有功矩阵  $P$  为多变量最优化问题目标函数的自变量。

配电网潮流决定于负荷、分布式光伏出力和线损, 在以净注入功率为变量的模型中, 潮流分布计算采用逐级上推的方式, 从线路的末端直至首端。定义支路传输功率矩阵为

$$P_T = [P_{T1} P_{T2} \cdots P_{Ti} \cdots P_{Tn}] \quad (6)$$

式中,  $P_{Ti}$  为各条支路传输的有功功率, 由式(7)计算。

$$P_T = A * P \quad (7)$$

式(7)为未考虑线路损耗的支路传输功率矩阵, 如计算中考虑线路损耗时, 如式(8)所示,

$$P_{T,i} = P_{T,i+1} + P_{V,i} - \Delta P_i \quad (8)$$

式中:  $\Delta P_i = \frac{P_{T,i+1}^2}{V_{i+1}^2} R_i$  为线路损耗;  $R_i$  为支路  $i$  的电阻;  $V_i$  为母线  $i$  的电压幅值。

考虑损耗计算时, 从叶子节点起至首节点逐级减去线路损耗的部分, 并更新公式  $P_T = A * P$  中的  $P$ , 再计算上一级的注入功率, 逐级更新注入功率, 递推至首节点。

定义支路压降矩阵,

$$\Delta V = [\Delta V_1, \Delta V_2, \dots, \Delta V_i, \dots] \quad (9)$$

式中,  $\Delta V_i$  为支路  $i$  对应电压降落。  $\Delta V_i$  采用电压降落定义计算, 如式(10)所示。

$$\Delta V_i = [(P_{T,i} R_i + Q_{T,i} X_i) + j(P_{T,i} X_i - Q_{T,i} R_i)] / V_i^* \quad (10)$$

无功就地动态补偿, 电压降落公式简化为

$$\Delta V_i = P_{T,i} (R_i + jX_i) / V_i^* \quad (11)$$

定义完整路径电压降落矩阵(即叶子节点至首节点的电压降落矩阵)为

$$V_{l \times 1} = R_{l \times n} \Delta V_{n \times 1} \quad (12)$$

式中:  $R_{l \times n}$  为叶子节点经过支路的完整路径矩阵;  $\Delta V_{n \times 1}$  为支路电压降落矩阵。

最终, 得到各叶子节点电压为

$$g(P) = \sqrt{[1.05 + \text{real}(V_{l \times 1})]^2 + \text{imag}(V_{l \times 1})^2} \quad (13)$$

结合潮流倒送情况下准入容量最大的判断, 得到电压不越上限的描述, 如式(14)所示。

$$g(P) \leq 1.1 \quad (14)$$

至此, 得到目标函数和约束条件矩阵描述, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} g(P) = \sqrt{[1.05 + \text{real}(V_{l \times 1})]^2 + \text{imag}(V_{l \times 1})^2} \\ f(P) = \sum_{i=1}^n P_i \\ g(P) \leq 1.1 \end{cases} \quad (15)$$

约束条件为  $P$  表示的叶节点的电压不越上限, 目标函数为各个节点净注入有功功率的和为最大。各个节点分布式光伏准入容量值可由式(5)确定。

## 4 准入容量计算方法

### 4.1 算法筛选

分布式光伏准入容量计算问题实质上是带约束多变量的最优化问题。在本文中, 问题被简化成带约束条件的单目标最优化问题。求最优解或近似最优解的方法主要有三种: 枚举法、启发式算法和搜索算法。枚举法实现难度大, 启发式算法对应规则的通用性不强, 与启发知识适当结合的搜索算法可在求解质量和求解效率上达到较好的平衡。

传统搜索方法中, 爬山法和解析方法属于局部优解方法。穷举法效率低且鲁棒性不强。遗传算法是利用随机化技术的高效搜索方法。

目前的遗传算法通过模拟达尔文“优胜劣汰、适者生存”的原理激励好的结构, 通过模拟孟德尔遗传遍历理论在迭代过程中保持已有的结构, 同时寻找更好的结构。作为一种随机化的优化与搜索方法, 遗传算法具有很强的通用性、良好的全局优化性和稳健性、良好的可操作性与简单性、良好的并行性等特点。

遗传算法的并行性将计算分成多段同时进行以节约时间。电压约束用矩阵形式描述, 可以通过一次代数计算得到所有叶子节点的电压, 也是并行的计算方法, 两者的结合有利于应对分布式光伏大面

积接入所带来的计算量问题。

### 4.2 计算流程概述

算法流程图如图4。

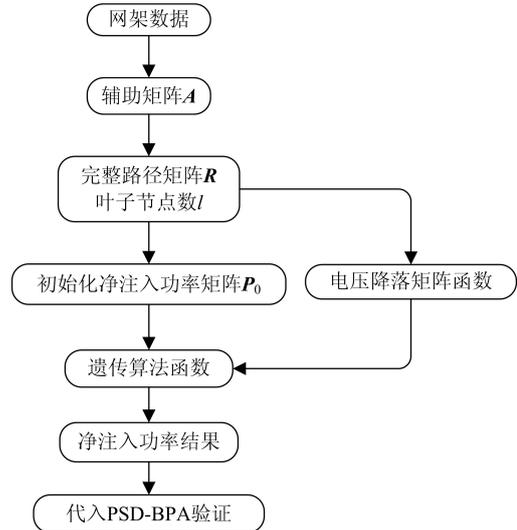


图4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flowchart

采用遗传算法计算准入容量时, 可调用 Matlab 中的遗传算法工具箱, 具体算法格式为

$$\text{ga}(@f, n, [], [], [], [], [x], [y], @g) \quad (16)$$

式中:  $@f$  为净注入功率和最大函数句柄;  $n$  为变量个数;  $x$  为变量下限矩阵;  $y$  为变量上限矩阵;  $@g$  为电压约束函数句柄。

## 5 仿真计算

IEEE11节点网络拓扑及基本参数如图5和表2所示。

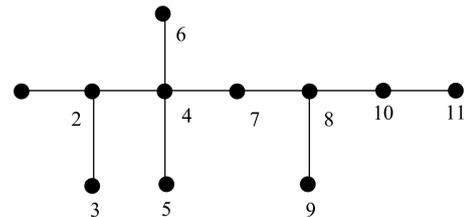


图5 IEEE11节点网络拓扑

Fig. 5 Network topology of IEEE11 node

采用 PSD-BPA 程序基于 IEEE11节点系统对算法进行仿真计算。为构成辐射性配电网, 将节点3和节点5间的支路去掉, 各个节点的功率均为节点净注入有功功率  $P$ 。进行了三种情景的仿真计算。

情景一: 分布式光伏无额外限制接入;

情景二: 分布式光伏按距离均匀分布接入;

情景三: 分布式光伏按节点均匀分布接入。

计算结果分别如表3—表5所示。

表 2 线路参数

Table 2 Line parameters

首节点	尾节点	阻抗标么值
1	2	j0.070 68
2	3	j0.153 99
2	4	0.037 73+j0.041 32
4	5	j0.459 35
4	6	j0.017 64
4	7	0.611 41+j0.811 77
7	8	0.162 09+j0.216 73
8	9	0.071 85+j0.717 97
8	10	0.409 77+j0.56
10	11	0.026 45+j0.264 59

表 3 各节点容量不加限制时净有功功率分布

Table 3 Net active power distribution when the capacity of each node is no limited

节点号	电压标么值	净注入有功标么值
1	1.05∠0°	0
2	1.103 6∠18.1°	5.1
3	1.103 6∠18.1°	0
4	1.103 6∠18.1°	0
5	1.103 6∠18.1°	0
6	1.103 6∠18.1°	0
7	1.103 6∠18.1°	0
8	1.103 6∠18.1°	0
9	1.103 6∠18.1°	0
10	1.103 6∠18.1°	0
11	1.103 6∠18.1°	0

由表3可以看出,在不加额外约束条件时,净注入功率集中在系统侧的首节点(可描述为:在配网的非首端节点接入与负荷大小相等的光伏容量,首端的节点集中接入光伏容量的情景),该情景下,整个配网光伏的准入容量最大。

实际配电网,光伏是按区域分散的,下面假设一种合理的场景:光伏准入容量与线路阻抗成正比分配,也即光伏按距离均匀分布接入,计算结果如表4所示。

由表4可以看出,分布式光伏按距离均匀分布时,整个配网的净注入有功总和为0.076 6 p.u.,远小于情景一中的5.1 p.u.。

国家能源局规划中,以单个村级节点准入容量相同为准入容量计算额外约束。不加功率上限约束时,光伏按节点均匀分布接入时的计算结果如表5所示。

由表5可以看出,由于节点电压限制,配网的净注入有功总和为0.106 p.u.,大于情景二中0.076 6 p.u.,依然远小于情景一中的5.1 p.u.。

表 4 各节点净注入有功按距离分布

Table 4 Net active power of each node distributed

based on distance		
节点号	电压标么值	净注入有功
1	1.05∠0°	0
2	1.05∠0.3°	0.001 635 7
3	1.05∠0.3°	0.003 563 6
4	1.052 5∠0.4°	0.000 956 2
5	1.052 5∠0.7°	0.010 630 4
6	1.052 5∠0.4°	0.000 408 2
7	1.086 7∠2.7°	0.018 786 2
8	1.092 7∠3.2°	0.005 015 6
9	1.093 9∠3.7°	0.016 615 5
10	1.099 ∠3.7°	0.012 959 7
11	1.100 1∠3.8°	0.006 123 2

表 5 各节点净注入有功按节点分布

Table 5 Net active power of each node distributed

based on node		
节点号	电压标么值	净注入有功
1	1.05∠0°	0
2	1.05∠0.3°	0.010 6
3	1.05∠0.3°	0.010 6
4	1.052 5∠0.4°	0.010 6
5	1.052 5∠0.7°	0.010 6
6	1.052 5∠0.4°	0.010 6
7	1.086 7∠2.7°	0.010 6
8	1.092 7∠3.2°	0.010 6
9	1.093 9∠3.7°	0.010 6
10	1.099 ∠3.7°	0.010 6
11	1.100 1∠3.8°	0.010 6

基于三种情景的仿真计算结果,得出如下原则:为实现区域配网分布式光伏准入容量的最大,应采用如下措施,即在首节点集中接入保证电压不越限的准入光伏容量,对非首端节点,在没有储能等其他措施的情况下,至多接入与负荷相当的准入容量的光伏。

基于所提出的接入建议,在进行计算时,提出加快计算速度的方法:计算配网首节点集中接入的净注入有功功率,并以此作为各节点净注入初始值上限,以减小遗传算法概率搜索的范围;对于集中接入值超过首节点区域因素限制的情景,可设定首节点初值上限,再进行计算。

对于已有分布式光伏接入的配电网,计算时对应母线净注入功率可设置为定值,以计算目标地区的实际光伏准入容量。

无功补偿是需注意的问题,仿真中,令配网向系统注入5.1 p.u.的有功功率,系统向配网提供1.898 6 p.u.的无功功率,导致首节点外其他母线的

电压下降到 0.984 p.u.。所以应避免大容量的有功和无功反向流动, 配网无功功率应动态就地补偿。

## 6 结论

提出了矩阵化描述的配网分布式光伏准入容量计算方法, 得出各个节点可接入光伏的准入容量。在仿真结果基础上提出光伏容量应在首节点集中接入、非首节点接入与负荷相当的光伏容量的建议, 此种接入方式下可接入的光伏准入容量最大。在光伏容量计算中采用设定净注入功率上限的方法以加快计算速度; 最后, 简要分析无功就地动态补偿的必要性。结论可对配电网分布式光伏可接入容量的确定提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 国家能源局关于印发《太阳能发展“十三五”规划》的通知[EB/OL]. [2016-12-08]. [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201612/t20161216\\_2358.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201612/t20161216_2358.htm)
- [2] LIEW S N, STRBAC G. Maximising penetration of wind generation in existing distribution networks[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(3): 256-262.
- [3] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 78-85. DOI: 10.1186/s41601-016-0018-9.
- [4] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [5] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [6] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.  
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [7] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 118-122.  
WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.
- [8] 唐彬伟. 并网光伏发电系统建模及最大接入容量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [9] 于辉, 王心, 赵冬梅. 以改造配电网设备适应性为目的的分布式电源准入容量计算[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3013-3018.  
YU Hui, WANG Xin, ZHAO Dongmei. Calculation of distributed generation permeability for the adaptability reform of distribution network equipment[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3013-3018.
- [10] 王超, 何阳, 夏翔, 等. 分布式电源准入容量对电力系统的影响分析[J]. 华东电力, 2006, 34(4): 1-4.  
WANG Chao, HE Yang, XIA Xiang, et al. Analysis of the voltage regulations based the maximum penetration level model of distributed generators[J]. East China Electric Power, 2006, 34(4): 1-4.
- [11] 王超. 分散电源准入容量对系统的影响及其电压调整研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [12] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-17.  
HU Hua, WU Shan, XIA Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-17.
- [13] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 87-92.  
SU Xiaoling, HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 87-92.
- [14] 刘健, 同向前, 潘忠美, 等. 考虑过电压因素时分布式光伏电源的准入容量[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 45-51.  
LIU Jian, TONG Xiangqian, PAN Zhongmei, et al. The maximum power of distributed PV generation according to over-voltage in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 45-51.
- [15] 张彼德, 何颀, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85.  
ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.

收稿日期: 2017-07-29; 修回日期: 2017-11-11

作者简介:

商立群(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: shanglq@xust.edu.cn

郭伟(1991—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 840113640@qq.com

(编辑 周金梅)