

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180685

倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析

曾强¹, 谢善益², 周刚², 邓楚然³, 彭泽武³, 张子杰⁴, 黎灿兵⁴

(1. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510000; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510000;
3. 广东电网有限责任公司信息中心, 广东 广州 510000; 4. 能源互联网智能信息分析与集成优化
湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410000)

摘要: 分布式电源(DG)接入配电网后, 低电压等级电网可能倒送功率至高电压等级电网, 对电网造成不利影响。在各种影响因素中, 倒送功率限制是影响 DG 接入电网的主要因素。从倒送功率约束的角度出发, 结合节点电压及潮流约束, 建立了以 DG 接入容量最大为目标的数学模型, 给出了最大接入容量的计算方法, 并分析了 DG 的接入对配电网有功网损的影响。考虑节假日对负荷的影响, 给出了调整倒送功率约束以增大 DG 接入容量的建议。以一个 33 节点的 10 kV 配电网接入分布式光伏电源为例, 验证了所提方法的可行性。

关键词: 分布式电源; 倒送功率; 最大接入容量; 配电网

Maximum capacity analysis for distributed generation considering reverse power constraint

ZENG Qiang¹, XIE Shanyi², ZHOU Gang², DENG Churan³, PENG Zewu³, ZHANG Zijie⁴, LI Canbing⁴

(1. Guangdong Power Grid Limited Liability Company, Guangzhou 510000, China; 2. Guangdong Power Grid Limited Liability Company Power Science Research Institute, Guangzhou 510000, China; 3. Guangdong Power Grid Limited Liability Company Information Center, Guangzhou 510000, China; 4. The Hunan Key Laboratory of Intelligent Information Analysis and Integrated Optimization for Energy Internet, Changsha 410000, China)

Abstract: Distributed Generation (DG) access to distribution network the power may be transmitted from low-voltage power grid to high-voltage, causing adverse impacts on power grid. Among all kinds of factors, the power restriction is the main factor that affects the access of DG to distribution network. A mathematical model of maximum capacity of DG is built when reverse power node voltage and power flow constraint are considered and then the calculation method is introduced in this paper. It also analyzes the effect of DG on active power loss of distribution network. Considering the effect of holidays on power load, the proposal of adjusting reverse power constraint to increase DG capacity is given. The feasibility of the proposed method is proved by the example of distributed photovoltaic (PV) generation access to a 33-node 10 kV distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51722701) and Scientific and Technology Project of Guangdong Power Grid (No. 039900KK52150001).

Key words: distributed generation (DG); reverse power; maximum capacity; distribution network

0 引言

分布式电源(Distributed Generation, DG)是指位于用户附近, 发电功率在几千瓦至数十兆瓦的发电单元^[1-4]。能源的短缺与环境的污染促进了 DG 的发展^[5-8]。电力行业是节能减排的主要行业^[9-11], DG 为

其提供了一种很有前景的节能减排途径^[12-15]。

为了最大限度地利用 DG, 希望 DG 的接入容量较大。然而 DG 的有功出力大于有功负荷则会产生功率的倒送, 原本用来降压的中压配电变压器在升压过程中不仅允许通过容量有所下降, 而且传输功率的损耗也将大幅提升^[16]。倒送功率的存在还会使线路中的保护装置复杂化, 因此, 在一些运行水平、保护配置等不到位的地区, 应当满足不向高电压等级电网倒送功率的限制。为了限制倒送功率,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51722701); 广东电网重点科技项目(039900KK52150001)

国家电网公司 Q/GDW 480-2010 标准^[17]——《分布式电源接入电网技术规定》——对 DG 的接入容量做了要求, 具体为: “分布式电源总容量原则上不宜超过上一级变压器供电区域内最大负荷的 25%”。然而, 考虑到负荷与 DG 的互补性, 25% 的 DG 接入容量限值在某些情况下可能过于保守, 在某些情况下又不足以避免倒送功率。

根据电网的不同要求, 确定允许接入电网的 DG 容量有多种数学模型。文献[18]考虑 DG 对配电网继电保护的影响, 建立了短路电流约束下的 DG 准入容量计算模型; 文献[19]通过分析 DG 对配电网电压分布和线路潮流的影响, 建立了考虑静态安全约束的 DG 准入容量计算模型; 文献[20]以节点电压和线路载流量为约束, 建立了有功网损最小的 DG 最大容量接入模型; 文献[21]在电压偏差和谐波约束下, 对配电网可接最大光伏容量进行了计算; 文献[22]考虑过电压因素, 研究了线路不出现过电压时分布式光伏电源的准入容量。

本文提出了一种考虑节假日对负荷的影响, 调整倒送功率约束从而增大 DG 接入容量的方法。以倒送功率约束、DG 出力约束、节点电压约束和潮流约束作为约束条件, 建立了 DG 最大接入容量的模型并给出了计算方法, 并对系统有功网损进行分析, 保证了在运行水平、保护配置等不到位的地区不发生功率倒送。

1 DG 接入的倒送功率限制

倒送功率至高电压等级电网, 不仅传输功率的损耗将大幅提升, 而且因降压变压器作升压变压器使用, 用户的电压合格率也可能受到影响。另外, 高电压等级电网的继电保护设置等也需要做出较大调整, 以适应反向潮流。DG 接入配电网, 为了减少其对电网造成的不利影响, 在一些运行水平、保护配置等不到位的地区, 应当满足不向高电压等级电网倒送功率的限制^[12]。

为简化分析, 本文将 DG 作为功率因数恒定的 PQ 节点。是否倒送功率至高电压等级电网, 可通过本级供电区域内有功负荷与 DG 有功出力的相对大小进行判断。多个 DG 接入同一供电区域时, DG 有功出力指所有 DG 的总有功出力。同一供电区域是指同一变压器同一电压等级的供电范围。以图 1 配电网为例, 可以分为 A、B、C 三个供电区域。因限制倒送功率是一个长期的过程, 故判断是否有倒送功率产生常以年为时间尺度。

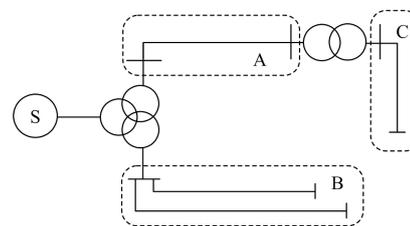


图 1 配电网供电区域划分

Fig. 1 Power supply areas division of distribution network

将全年以小时为单位划分为 H 个时间段(一般为 8760), 同一供电区域内 DG 有功出力的时间序列如式(1)所示。

$$P_{DG} = \{P_{DG,t} | t=1, 2, \dots, H\} \quad (1)$$

式中: t 为采样时刻, 对应 H 个时间段; P_{DG} 为 DG 的有功出力; $P_{DG,t}$ 为 t 时刻 DG 的有功出力。

与 DG 相同供电区域内有功负荷的时间序列如式(2)所示。

$$P_L = \{P_{L,t} | t=1, 2, \dots, H\} \quad (2)$$

式中: P_L 为有功负荷; $P_{L,t}$ 为 t 时刻的有功负荷。

某时刻净负荷(某时刻有功负荷与同一时刻 DG 的有功出力之差)为

$$P'_t = P_{L,t} - P_{DG,t} \quad (3)$$

式中, P'_t 为 t 时刻净负荷。

净负荷的正负情况用于判断是否有倒送功率产生。若 $P'_t \geq 0$, 则 t 时刻无倒送功率; 若 $P'_t < 0$, 则 t 时刻有倒送功率。

2 DG 最大接入容量模型

2.1 目标函数

本文以 DG 装机容量之和为其最大接入容量。随着 DG 的快速发展, 配电网中出现多个 DG 同时并网的情况也越来越多。考虑多个 DG 同时并网, 同一供电区域内 DG 最大接入容量的目标函数可表示为

$$\max(\sum_{k=1}^N P_{DGk}) \quad (4)$$

式中: N 为同一供电区域的 DG 数量; P_{DGk} 为第 k 个 DG 的装机容量。

2.2 约束条件

一定容量的分布式发电接入配电网对馈线上的电压分布产生具体影响的大小与分布式发电的(总)容量大小及接入位置有极大的关系^[23]。因此, 本文 DG 接入容量不仅要考虑倒送功率约束, 还要考虑节点电压是否超限以及线路潮流约束。图 2 是一个在节点 i 接入 DG 的辐射型网络。

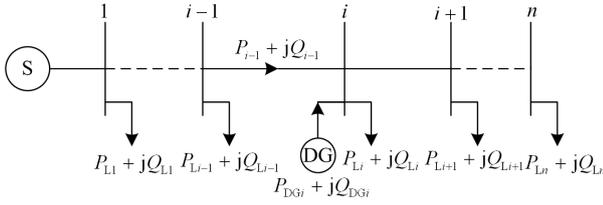


图2 含分布式电源的辐射型网络

Fig. 2 Radial network with DGs

1) 倒送功率约束

根据 2.1 节的分析可知, 当供电区域内净负荷出现负值时, 则会有倒送功率产生。因负荷与 DG 出力均具有随机性, 使得预测具体出现倒送功率的时刻与相应时刻的负荷大小变得困难。因此, 为了限制倒送功率, 常以供电区域内有功负荷的谷值作为该区域 DG 有功出力的极限值, 如式(5)所示。

$$\sum_{k=1}^N P_{DGk} \cdot \eta_{k \max} \leq P_{L \min} \quad (5)$$

式中: $\eta_{k \max}$ 为第 k 个 DG 系统有功功率输出的最大效率; $P_{L \min}$ 为第 k 个 DG 系统所在节点到节点 n 的有功负荷最小值的总和。

由式(5)可知, 在最严重的情况下, 即供电区域内所有 DG 有功出力均为最大值且该区域有功负荷处于最小值时, 净负荷依然不会出现为负的情况。不同供电区域的负荷存在差异, 有功负荷最小值也不尽相同, 需具体分析确定。

2) DG 出力约束

受自身设备以及外界环境等约束, DG 的输出功率受到一定限制。为了使 DG 的有功出力尽可能大, 要求 DG 保持高功率因数运行。本文设 DG 的功率因数为 1。DG 出力约束可表示为

$$\begin{cases} 0 \leq P'_{DGk} \leq P_{DGk} \cdot \eta_{k \max} \\ Q'_{DGk} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P'_{DGk} 为第 k 个 DG 的有功出力; Q'_{DGk} 为第 k 个 DG 的无功出力。

3) 节点电压约束及潮流约束

由于 DG 的有功出力, 上级线路上流过的潮流减小, 若 DG 的有功出力大于负荷需求, 则会引起上级线路上潮流过载。分布式电源的接入使线路潮流发生变化, 从而引起节点电压的变化。为了确定在计算所得 DG 最大接入容量的情况下, 节点电压不越限, 对于 n 节点系统, 节点电压约束可表示为

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (7)$$

式中: $U_{i \min}$ 为第 i 个节点所允许的节点电压最小值;

$U_{i \max}$ 为第 i 个节点的节点电压最大允许值。

在图 2 所示的链式配电网中, 对应于节点 i , 节点的有功功率和无功功率如式(8)、式(9)所示。

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

式中: U 为节点电压幅值; θ 为节点电压相角; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路上的电导和电纳。则其潮流约束可表示为

$$P_i = P_{DG_i} - P_{L_i} \quad (10)$$

$$Q_i = Q_{DG_i} - Q_{L_i} \quad (11)$$

式中: P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 分别为 DG 的有功、无功出力; P_{L_i} 、 Q_{L_i} 分别为节点 i 负荷的有功、无功功率。

4) 约束的处理

采用罚函数的思想, 将倒送功率约束结合到目标函数中, 可得新的目标函数为

$$\min f = -\left(\sum_{k=1}^N P_{DGk} \right) + \mu \cdot \max^2 \left\{ 0, \left(\sum_{k=1}^N P_{DGk} \cdot \eta_{k \max} - P_{L \min} \right) \right\} \quad (12)$$

式中, μ 为罚因子。

2.3 计算方法

目标函数是确定同一供电区域内 DG 的最大接入容量, 可看作一个变量, 可采用枚举法便捷求解。首先给定一个较小的 DG 有功出力和一个较大的 DG 增长量 ΔP , 定义的精度 ε , 计算其对应的目标函数值, 用此时的 DG 接入容量进行潮流计算, 判断节点电压是否越限, 潮流是否过载, 若是则判断 ΔP 是否小于精度 ε , 若小于, 则较小的 DG 有功出力是所求, 否则减小 ΔP , 重复计算; 若节点电压不越限且潮流不过载, 再增加 DG 有功出力, 计算其对应的目标函数值, 比较两者大小, 若后者较小, 则继续增大 DG 的大小, 直到不能再增加 DG 有功出力为止。再减小 ΔP , 重复以上计算, 直到 ΔP 小于精度 ε , 然后结合 DG 系统有功功率输出的最大效率, 求得 DG 最大接入容量。不同 DG 系统有功功率输出的最大效率可能不同, 为了简化分析, 本文按相同计算。图 3 为计算流程图, 其中 $P_{DG}^{(m)}$ 为 DG 有功出力, η_{\max} 为 DG 系统有功功率输出的最大效率。

2.4 DG 接入对配电网有功网损的影响

DG 的接入会减小配电网上级线路对末端负荷的供电, 从而有利于减小传输过程中产生的有功网损。但若 DG 接入容量过大, 超出其后节点负荷功率和, 产生倒送功率, 则有可能导致有功网损的增大。根据式(8)、式(9)可以写出线路有功网损的表达式为

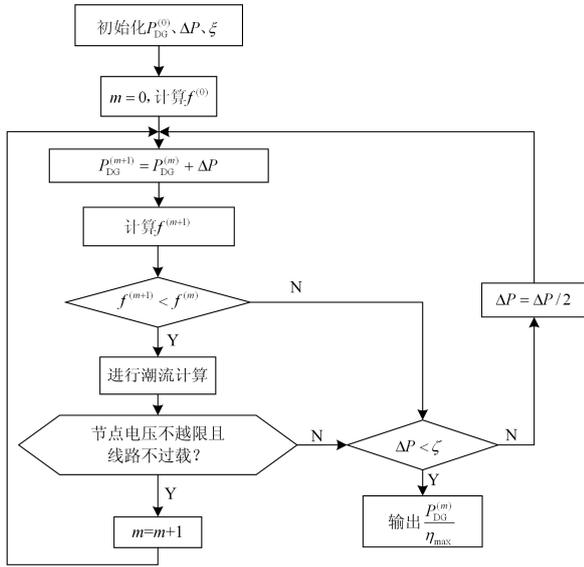


图3 DG最大接入容量计算流程

Fig. 3 Calculation flow chart of DG maximum capacity

$$\Delta P_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_i^2} R_{ij} \quad (13)$$

式中: ΔP_{ij} 为线路 i, j 之间的有功损耗; R_{ij} 为线路 i, j 上的电阻; P_{ij}, Q_{ij} 是线路 i, j 之间的潮流。

3 倒送功率约束的调整

节假日对负荷的影响较大,且规律明显。工业、企事业单位等负荷,节假日期间一般会有明显降低。形成一年中负荷持续较高,个别时段负荷相对较低的情况。对于此类负荷,以式(5)的方法限制倒送功率,对DG的接入容量限制较大,不利于充分利用DG促进节能减排。

为此,建议按照日类型对负荷进行分类,以非节假日有功负荷的谷值作为DG接入容量的极限值。倒送功率约束调整为

$$\sum_{k=1}^N P_{DGk} \cdot \eta_{k\max} \leq P'_{L\min} \quad (14)$$

式中, $P'_{L\min}$ 为非节假日负荷的最小值。

式(14)方法可以保证非节假日无倒送功率产生,但在节假日可能出现倒送功率。产生倒送功率时,需采取降低DG有功出力的方法予以限制。调整后,因倒送功率只可能出现在节假日,时间较短,限制DG有功出力对充分利用DG影响很小,但可以使DG以较大容量接入。

调整倒送功率约束后,DG最大接入容量的计算流程仍如图3所示,只需将约束条件由式(5)换为式(14)即可。

4 算例分析

本文以一个33节点的10kV配电网作为算例分析^[24]。图4给出了算例模型,这是一个典型的辐射状链式配电网,其中节点1是额定电压为10kV的供电变电站。

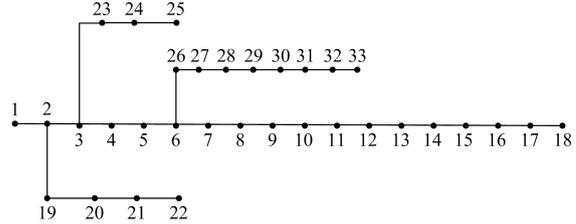


图4 33节点10kV配电网算例

Fig. 4 33-bus 10 kV distribution network example

表1给出了该配电网部分节点的负荷情况。文献^[25]研究表明,DG接入点越靠近配电网末端,对电压分布的影响就越大,也更可能出现电压越限。因此,本文分别选择配电网主线路末端节点18、支路末端节点25、33和位于配电网中间的节点10作为DG的接入点,对比倒送功率约束调整前后的计算结果。

表1 10kV电压等级配电网部分节点负荷情况

Table 1 Loads details of 10 kV distribution network

节点号	工作日最小有功负荷/kW	节假日最小有功负荷/kW	最大有功负荷/kW
10	2 408	803	6 429
18	178	67	567
25	226	53	1 034
33	109	33	331

4.1 倒送功率约束调整前DG接入容量计算

根据本文提出的方法,未调整倒送功率约束时,分别计算节点10、18、25、33可接分布式光伏电源的最大容量,结果如表2所示。计算中分布式光伏电源系统有功功率输出的最大效率取0.75。对比4个节点可接分布式光伏电源的最大容量可得,最小负荷较大的节点,可接分布式光伏电源的最大容量也相对较高。

表2也给出了4个节点可接分布式光伏电源的最大容量与其最大负荷的比值情况。负荷差异使得4个节点的比值产生差别,节点25的比值最小,为6.87%;节点10的比值最大,为16.64%。但与国家电网公司Q/GDW 480-2010标准给出的25%相比,相差较大。如果节点25按照其最大负荷的25%接入分布式光伏电源,则倒送功率最大可达其最大负荷的18.13%。考虑到一些区域负荷峰谷差较小,负荷利用率较高,DG接入容量限值也可能大于25%。

此时按照 25%的比例接入 DG, DG 可接入容量值将被低估。因此, 在确定 DG 接入容量限值时, 建议结合实际负荷情况具体分析。

表 2 节点可接分布式光伏电源的最大容量

Table 2 PV maximum capacity connected to nodes

节点号	可接最大光伏	最大光伏容量与最大负荷的
	容量/kW	比值/%
10	1 070	16.64
18	89	15.70
25	71	6.87
33	44	13.29

4.2 倒送功率约束调整后 DG 接入容量计算

由表 1 分析可知, 该配电网 4 个节点在节假日最小有功负荷与工作日最小有功负荷相差较大, 符合一年中负荷持续较高、个别时段负荷相对较低的情况。

根据本文提出的方法, 调整倒送功率约束后, 计算得到 4 个节点可接 DG 的最大容量如表 3 所示。调整倒送功率约束后, 4 个节点可接分布式光伏电源的最大容量与其最大负荷的比值情况, 均远超 25%。其中, 节点 10 最大, 达到 49.95%。如果节假日有倒送功率产生, 可通过断开部分光伏开关柜调整光伏侧发电量的措施予以限制。

表 3 调整约束后节点可接分布式光伏电源的最大容量

Table 3 PV maximum capacity connected to nodes after constraint adjustment

接入节点号	可接最大光伏	最大光伏容量与最大负荷的
	容量/kW	比值/%
10	3 211	49.95
8	237	41.80
25	301	29.11
33	145	43.81

比较调整倒送功率约束前后位于配电网不同位置的 4 个节点可接分布式光伏电源的最大容量, 如图 5 所示。调整倒送功率约束前后, 配电网 4 个节点可接分布式光伏电源最大容量差异明显。调整倒送功率约束后, 节点可接分布式光伏电源容量大幅提升, 有利于充分利用光伏。

分析表 1、表 2、表 3 可知, 负荷较大区域的 DG 最大准入容量也相对较高, 这与文献[19, 26]所得结论一致。文献[19, 26]都考虑节点电压约束和潮流约束, 文献[26]还考虑了 DG 本身约束, 但都没有对倒送功率进行限制, 因而所得其他结论与本文不尽相同。其中文献[26]算例仿真所得平衡节点有功功率 P_0 为负, 说明该配电网中的 DG 向系统倒送了一定的有功功率。

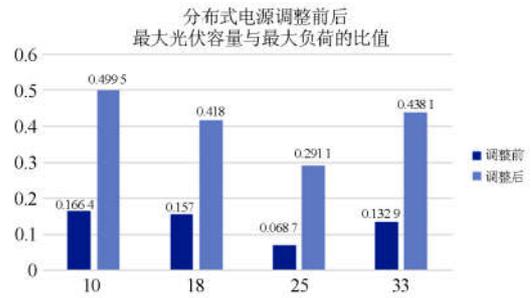


图 5 调整前后 DG 最大接入容量对比

Fig. 5 Comparison of PV maximum capacity connected to nodes

4.3 DG 接入对配电网有功网损的影响

表 4 给出了配电网不接 DG、倒送功率调整前、倒送功率调整后 DG 接入的情况下配电网的有功网损大小变化。

表 4 不同情况下配电网的有功网损

Table 4 Active power loss of distribution network under different conditions

DG 接入点	节点 10	节点 18	节点 25	节点 33
不接 DG/kW	267	267	267	267
调整倒送功率调整前/kW	221	261	266	266
调整倒送功率调整后/kW	160	251	263	263

由表 4 可以看出, 在倒送功率约束下, 接入 DG 会在一定程度上减小配电网的有功网损。调整倒送功率约束, DG 的接入容量增大, 配电网的有功网损反而降得更低。这与文献[27]所得结论一致, DG 容量增大但小于系统总负荷量时, 线路中无倒送功率, 网损减小。

5 结论

低电压等级电网倒送功率至高电压等级电网, 会对电网造成不利影响, 因此有必要限制倒送功率。以配电网中 DG 的接入容量最大化为目标函数, 倒送功率约束、DG 本身的约束、电压约束、潮流约束为约束条件, 形成了配电网中 DG 最大接入容量的数学模型。因工业、企事业单位等负荷在节假日期间一般会有明显降低, 为了增大 DG 的接入容量、促进节能减排, 对此类负荷的倒送功率约束进行了调整。以一个 33 节点的 10 kV 配电网为算例, 验证了该模型的有效性与正确性。算例中分析了负荷差异对 DG 接入容量限值的影响, 结果表明负荷差异对 DG 接入容量限值的影响较大, 在确定 DG 接入容量限值时, 应结合实际负荷情况具体分析。此外, 算例还分析了 DG 接入对配电网有功网损的影响, 结果表明在倒送功率约束下, 接入 DG 会在一定程

度上减小配电网的有功网损,调节倒送功率约束也能改善系统有功网损。对于 DG 的最大接入容量问题,还有其他约束条件诸如与 DG 并网运行有关的动态约束等,因此确定最优的 DG 接入容量还需综合考虑其他约束条件。

参考文献

- [1] EL-KHATTAM W, SALAMA M M A. Distributed generation technologies, definitions and benefits[J]. *Electric Power Systems Research*, 2004, 71(2): 119-128.
- [2] 陈海东. 基于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(21): 106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(21): 106-111.
- [3] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1): 85-91.
- [4] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(15): 67-72.
- [5] 李军, 颜辉, 张仰飞, 等. 配电网和微网中分布式电源选址定容方法对比分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(5): 147-154.
LI Jun, YAN Hui, ZHANG Yangfei, et al. Comparison of locating and sizing methods of DGs between in micro-grids and in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(5): 147-154.
- [6] 黎灿兵, 刘文灿, 曹一家, 等. 管制市场中激励分布式能源发电的电能虚拟存储政策[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(19): 3141-3147.
LI Canbing, LIU Wencan, CAO Yijia, et al. Electrical power virtual storage policy for stimulating distributed generation in regulated markets[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(19): 3141-3147.
- [7] PIPATTANASOMPORN M, WILLINGHAM M, RAHMAN S. Implications of on-site distributed generation for commercial/industrial facilities[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(1): 206-212.
- [8] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid—a case study[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 245-256. DOI: 10.1186/s41601-017-0055-z.
- [9] 黎灿兵, 刘珂, 曹一家, 等. 低碳发电调度与节能发电调度的一致性评估[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(31): 94-101.
LI Canbing, LIU Yu, CAO Yijia, et al. Consistency evaluation of low-carbon generation dispatching and energy-saving generation dispatching[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(31): 94-101.
- [10] 张世翔, 邵慧壮. 含分布式电源的配电网优化研究[J]. *中国电力*, 2017, 47(5): 88-91.
ZHANG Shixiang, SHAO Huizhuang. Optimization research of distribution network considering distributed generation[J]. *Electric Power*, 2017, 47(5): 88-91.
- [11] 孙建梅, 陈璐. 基于 LCOE 的分布式光伏发电并网效益分析[J]. *中国电力*, 2018, 51(3): 88-93.
SUN Jianmei, CHEN Lu. Analysis on grid-connected benefit of distributed photovoltaic power generation based on LCOE model[J]. *Electric Power*, 2018, 51(3): 88-93.
- [12] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配电网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(6): 120-125.
ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(6): 120-125.
- [13] ZOU K, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(1): 112-123.
- [14] 高亮, 郎陈杰, 夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(18): 143-149.
GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong. Design of distribution network with DG[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(18): 143-149.
- [15] HE J, LIU L, DING F, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.
- [16] 于建成, 迟福建, 徐科, 等. 分布式电源接入对电网的影响分析[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2012, 24(1):

- 138-141.
YU Jiancheng, CHI Fujian, XU Ke, et al. Analysis of the impact of distributed generation on power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1): 138-141.
- [17] 国家电网公司. 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 480—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
The State Grid Corporation of China. Technical rule for distributed resources connected to power grid: Q/GDW 480—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [18] 连欣乐, 吴政球, 赵柯宇, 等. 计及短路电流约束的分布式电源准入容量的计算[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(1): 50-55.
LIAN Xinle, WU Zhengqiu, ZHAO Keyu, et al. Maximum penetration capacity calculation for distributed generation taking into account fault current constraint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(1): 50-55.
- [19] 夏成军, 崔弘, 王强, 等. 考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 96-100.
XIA Chengjun, CUI Hong, WANG Qiang, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 96-100.
- [20] 胡美玉, 胡志坚, 史梦梦. 基于改进粒子群优化算法的 DG 准入容量与优化布置[J]. 电力建设, 2014, 35(12): 111-115.
HU Meiyu, HU Zhijian, SHI Mengmeng. Penetration level and optimize layout of distributed generation based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 111-115.
- [21] 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 Siqu, et al. Maximum photovoltaic penetration considering voltage deviation and harmonic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 49-55.
- [22] 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.
- [23] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 57-60.
WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. The influence of distributed generation on voltage distribution of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 57-60.
- [24] 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. The access capacity of distributed power supply and the practical method of optimal layout[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.
- [25] 刘蓓, 汪飒. 配电网供电可靠性的分布式电源选址与定容[J]. 电源技术, 2016, 40(2): 410-412.
LIU Bei, WANG Feng. Siting and sizing of distributed generation based on distribution system reliability[J]. Power Source Technology, 2016, 40(2): 410-412.
- [26] 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.
- [27] 刘磊, 江辉, 彭建春. 分布式发电对配电网网损和电压分布的影响[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 279-283.
LIU Lei, JIANG Hui, PENG Jianchun. Impact of distributed generation on distribution system power loss and voltage profile[J]. Computer Simulation, 2010, 27(4): 279-283.

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-10-18

作者简介:

曾强(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为配网自动化、智能配电网、电压质量、信息化研究与应用;
E-mail: sdzq1368@163.com

谢善益(1971—), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 研究方向为电网自动化、信息化及智能化技术研究与应用。
E-mail: kways@126.com

(编辑 魏小丽)