

DOI: 10.7667/PSPC170606

基于耐受渗透比的 10 kV 配电网分布式电源规划

张勇军¹, 林晓明¹, 张紫珩¹, 赵维兴², 姚璐²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 贵州电网有限责任公司贵安供电局, 贵州 贵安 550003)

摘要: 针对目前分布式电源(DG)规划方法建模求解复杂的问题, 提出配电网 DG 耐受渗透比的概念。分析了配电网特征参数对耐受渗透比的影响, 并提出了一种基于耐受渗透比的 10 kV 配电网 DG 规划方法。首先根据 10 kV 配电线路的电气特征进行分类。然后建立各类线路的基态线路模型。其次在同类线路的特征参数范围内, 取极端情况通过基态线路模型进行计算, 得到 10 kV 配电线路的耐受渗透比。最终形成各类线路耐受渗透比推荐表, 指导配电网的分布式电源规划。算例结果验证了该方法的有效性和正确性。

关键词: 耐受渗透比; 特征参数; 分布式电源规划; 配电网

Distributed generation planning of 10 kV distribution network based on tolerant permeability ratio

ZHANG Yongjun¹, LIN Xiaoming¹, ZHANG Ziheng¹, ZHAO Weixing², YAO Lu²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guian Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd, Guian 550003, China)

Abstract: Focused on the problem of complex modeling and solving process in Distributed Generation (DG) planning at present, the concept of DG tolerant permeability ratio in distribution network is proposed. The influence of characteristic parameters on tolerant permeability ratio is analyzed. A novel method of DG planning is put forward based on tolerant permeability ratio in 10 kV distribution network. Firstly, the 10 kV distribution lines are classified according to their own electrical characteristics. Secondly, the base-state models of each type of lines are established. Thirdly, the tolerance permeability ratio of 10 kV distribution lines in extreme parameter situation are calculated through base-state model, within the range of characteristic parameters among similar lines. Finally, the tolerance penetration ratio recommended tables of each type of lines are made to guide DG planning in distributed network. The validity and correctness of the proposed method are verified by the results of calculation case.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777077).

Key words: tolerant permeability ratio; characteristic parameter; distributed generation planning; distribution network

0 引言

分布式电源(Distributed Generation, DG)的应用以接入配电网运行为主, 其接入使单电源放射型的传统网络变成多电源分散分布的有源网络。DG 接入不合理, 会带来电压越限和波动等问题, 影响配电网的安全性、经济性和可靠性^[1-3]。

DG 规划是主动配电网的重要内容, 有利于充分发挥 DG 的优势并减小其负面影响^[4]。DG 规划是大规模的多约束条件的非线性优化问题^[5], 规划任务是在已确定的网架信息和给定负荷预测的基础

上, 以系统的运行成本最小、安全稳定和环境效益最大等为目标^[6-7], 选择合适的 DG 类型, 合理地确定 DG 安装容量和安装位置^[8-9]。根据不同的规划目标和要求, DG 规划有不同的规划模型^[10]。文献[11]建立了有源配电网综合投资规划模型, 考虑了 DG 机组上网电价的约束, 兼顾了分布式发电商的利益, 并采用启发式人鱼算法对模型进行求解; 文献[12]考虑了负荷和 DG 的时序特性, 得到典型场景及其权重, 建立了考虑网损和可靠性的多目标 DG 规划模型; 文献[13]基于年节约费用、电压偏差、系统供电可靠性和低碳指标, 构建主动配电网的综合优化模型, 引入 1-9 标度理论, 得到合理的权重系数, 并用隶属度函数对各指标值进行隶属化。此外, 文

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51777077)

献[14]还提出了 DG 规划的解析计算方法。这些解析算法本质上是建模规划方法在若干理想条件下的特例。

上述配电网 DG 规划的建模方法面临着以下问题：在实际工程中建模困难，求解复杂甚至无法求解；算例多采用 IEEE 的虚拟节点系统^[15]，在实际线路的验证效果未知；对于大量同类配电线路，需要依次计算，不具有普适性。随着 DG 在配电网的广泛应用，对在工程应用中，如何根据有限的数，以合理、简洁的方法确定满足要求的 DG 规划方案具有至关重要的意义。针对以上问题，本文首先提出配电网 DG 耐受渗透比(Tolerant Permeability Ratio, TPR)的概念，从机理上分析了配电线路特征参数对 TPR 的影响，并提出了一种基于 TPR 的 10 kV 配电网 DG 规划方法，以期指导大量实际配电线路的 DG 配置规划。

1 耐受渗透比

配电网的 DG 规划通常以 DG 安装容量来衡量配电网 DG 消纳能力。合理的 DG 安装容量与负荷情况、配变总容量、线径、线路长度、首端母线电压和 DG 安装位置等众多因素相关^[16]。不同实际的配电线路之间物理参数和运行状态存在差异。现有 DG 规划方法，需要针对特定的线路获取详细的参数信息进行建模求解，这使得规划过程更加复杂困难。为了得到具有普适性和工程实用性的 DG 规划方法，考虑到配电网的配变总容量和线路截面积，一般是按照配电线路的额定容量成比例进行设计和建设的，本文提出了耐受渗透比的概念。

耐受渗透比是指满足电压和电流的安全性约束，或者网损的经济性约束时，配电线路能够承受的 DG 渗透比。仅考虑安全性时，TPR 取电压和电流约束下的最小值，即不造成电压越限和电流过载的最大渗透比值；兼顾安全性和经济性，TPR 取电压、电流和网损约束下的最小值，即不造成电压越限、电流过载和网损超过规划设定允许值的最大渗透比值。

渗透比，定义为全线路范围内 DG 的最大出力(这里假设近似等于 DG 总装机容量)与配电线路额定传输容量之比，即

$$\delta = \frac{\sum P_{DG}}{S_N} \quad (1)$$

$$S_N = \sqrt{3}U_N I_N \quad (2)$$

式中： δ 为配电线路的渗透比； $\sum P_{DG}$ 为 DG 总装机容量； S_N 为配电线路的额定容量； U_N 、 I_N 分别为配

电线路额定电压和额定电流。

2 特征参数对 TPR 的影响分析

TPR 不仅受配电网结构参数和运行参数等特征参数的影响，而且与 DG 的分布方式有关。研究表明，影响 TPR 的主要特征参数有线路配变平均负载率 α 、首端母线电压 U_0 、主干线总长度 L 和负荷平均功率因数 $\cos\varphi$ 。各特征参数定义如下。

线路配变平均负载率 α 定义为某一负荷水平下配电线路的总有功负荷 $\sum P_i$ 与配变总容量 $\sum S_{Ti}$ 之比：

$$\alpha = \frac{\sum P_i}{\sum S_{Ti}} \quad (3)$$

负荷平均功率因数 $\cos\varphi$ 定义为某一负荷水平下配电线路总有功负荷 $\sum P_i$ 和总负荷容量 $\sum S_i$ 之比：

$$\cos\varphi = \frac{\sum P_i}{\sum S_i} \quad (4)$$

2.1 电压约束分析

两个 DG 接入配电网后的等效模型如图 1 所示。馈线首端母线电压为 U_0 ；配电网主干线有 N 个节点，节点 i 的电压为 U_i ，负荷功率为 $S_i=P_i+jQ_i$ ；节点 $i-1$ 和节点 i 间的线路定义为线路 L_i ，其阻抗为 R_i+jX_i ；DG₁ 接入节点 m ，输出功率为 $S_{DG1}=P_{DG1}+jQ_{DG1}$ ；DG₂ 接入节点 n ，输出功率为 $S_{DG2}=P_{DG2}+jQ_{DG2}$ 。为了分析 DG 分布方式对电压的影响，假设 DG 总输出功率恒定，即 $S_{DG}=S_{DG1}+S_{DG2}$ 恒定。

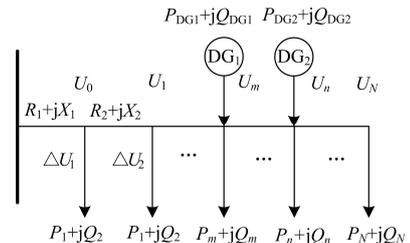


图 1 两个 DG 接入配电线路的等效模型

Fig. 1 Equivalent model of distribution line with double DGs

配电线路最容易出现电压越上限的节点为 DG 并网节点， U_m 和 U_n 的较大者是限制 DG 消纳容量的因素。当 DG₁ 和 DG₂ 输出功率变化时，由于 DG 总输出功率不变，首端至节点 m 之间的线路潮流不变，在 U_0 恒定的情况下， U_m 恒定。 S_{DG2} 越大， m 向 n 流动的功率越小或逆向功率越大，因此 U_n 越大。当 $S_{DG1}=0$ 且 $S_{DG2}=S_{DG}$ 时， U_n 最大，配电线路最容易出现电压越限。因此 DG 总输出功率不变时，DG 在更靠近末端的节点集中接入时，电压越限风险更大。对于多个 DG，分析可得相同结论。

当 DG 在末端节点 N 集中接入时, 配电线路最容易出现电压越限。此时, 末端节点电压为

$$U_N = U_0 + \sum_{i=1}^N \frac{R_i (P_{DG} - \sum_{j=i}^N P_j) + X_i (Q_{DG} - \sum_{j=i}^N Q_j)}{U_i} \quad (5)$$

由式(5)可知, 相同 DG 接入容量, 配变平均负载率越小, 首端母线平均电压越高, 主干线长度越长, 负荷平均功率因数越高, U_N 越大。

2.2 电流约束分析

DG 集中接入, 更容易导致线路电流越限。当 DG 在节点 p 集中接入时, 线路 L_k 的电流为

$$i_k = \begin{cases} \frac{\sqrt{(\sum_{i=k}^N P_i - P_{DG})^2 + (\sum_{i=k}^N Q_i - Q_{DG})^2}}{U_{k-1}} & (k \leq p) \\ \frac{\sqrt{(\sum_{i=k}^N P_i)^2 + (\sum_{i=k}^N Q_i)^2}}{U_{k-1}} & (k > p) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当 DG 接入容量足够大时, 最先出现电流越限的路为 L_p , 该段线路电流为

$$i_p = \frac{\sqrt{(\sum_{i=p}^N P_i - P_{DG})^2 + (\sum_{i=p}^N Q_i - Q_{DG})^2}}{U_{m-1}} \quad (7)$$

由式(7)可知, 电流约束下, 相同 DG 接入容量, 接入节点 p 位置越靠后, i_p 越大。因此, 当 DG 在末端节点集中接入时, 最容易出现电流越限。此时线路 L_N 的电流为

$$i_N = \frac{\sqrt{(P_{DG} - P_N)^2 + (Q_{DG} - Q_N)^2}}{U_{N-1}} \approx \frac{\sqrt{P_{DG}^2 + Q_{DG}^2}}{U_{N-1}} \quad (8)$$

由式(8)可知, 电流约束下不同的线路特征参数通过电压 U_{N-1} 对 TPR 产生影响, 由于电压变化很小, 可以忽略线路特征参数对 i_N 的影响。

2.3 网损约束分析

为了分析 DG 分布方式对网损的影响, 将 DG 的供电范围看成“负荷块”, 节点负荷看成该点的质量, 引入“负荷质心”的概念, 负荷块内各节点负荷到负荷质心的负荷平方矩相等^[17]。当 DG 接入位置离负荷质心更近, 线路损耗更小^[17]。对于图 1 的情况, 当 DG 在离负荷质心更远的节点集中接入时, 线路损耗更大。对于多个 DG, 分析可得相同结论。

当 DG 在首端或者末端节点集中接入时, 线路网损最大。DG 接入容量足够大时, 当 DG 在首端节点集中接入时, 配电线路的有功损耗等于无 DG

接入的情况, 并不会造成网损越限; 因此 DG 在末端节点集中接入时最容易出现网损越限。此时, 配电线路总有功损耗为

$$P_{Loss} = \sum_{i=1}^N \frac{(\sum_{j=i}^N S_j - S_{DG})^2 R_i}{U_{i-1}^2} \quad (9)$$

由式(9)可知, 相同 DG 接入容量, 配变平均负载率越小, 首端母线平均电压越高, 主干线长度越长, 负荷平均功率因数越高, P_{Loss} 越大。

2.4 TPR 极端情况分析

综上可知, DG 在末端节点集中接入时, 配电线路最容易出现电压、电流和网损越限。

配电线路运行过程中, 配变平均负载率、母线电压和负荷平均功率因数在一定范围内波动。由上述分析, 考虑极端情况, 电压约束和网损约束下应取最小配变平均负载率 α_m 、最高母线电压 U_{0m} 和最高负荷平均功率因数 $\cos\phi_m$ 进行计算。

同类型配电线路之间, 最小线路配变平均负载率、最高母线电压、主干线长度率、最高母线电压、主干线长度和最高负荷平均功率因数等特征参数存在差异。为了得到普适性的 TPR 推荐值, 考虑这些特征参数在一定范围内变化, 此时 TPR 取最小时的极端情况如表 1 所示。

表 1 特征参数的极端情况

Table 1 Extreme situation of characteristic parameter				
约束	最小线路配变平均负载率 α_m	最高母线电压 U_{0m}	主干线长度 L	最高负荷平均功率因数 $\cos\phi_m$
电压	最小	最高	最长	最高
电流	—	—	—	—
网损	最小	最高	最长	最高

3 DG 规划思路

目前的配电网 DG 规划方法, 需要众多细致的配电线路参数信息, 根据规划要求和目标, 建立并求解规划模型, 得到 DG 规划方案。对于繁多的配电线路, 采用穷举式的建模规划方法并非长久之路。以 TPR 来衡量配电网允许接入 DG 容量的大小, 更加简洁直观。考虑到特性相近的配电线路, 其 DG 消纳能力是相近的, 因此, 本文提出的 DG 规划方法步骤如下: 首先根据 10 kV 配电网的电气特征进行分类, 然后建立各类线路的基态线路模型^[17], 其次通过基态线路模型在特征参数极端情况下进行计算, 得到在配电网 TPR, 最后形成各类配电线路 TPR 推荐表, 指导具有不同特性的实际配电线路 DG 规划建设。规划思路如图 2 所示。

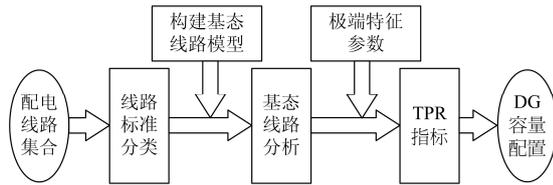


图 2 基于耐受渗透比的 DG 规划思路
Fig. 2 DG planning idea based on TPR

配电线路类型标准主要根据上一节所述的特征参数所表征的电气特性进行划分，具体分为电缆线路和架空线路两类。构建两类配电线路的基态线路模型，基态线路模型特征参数的基态值为区域性同电压等级的配电网的平均水平，选取具有典型拓扑的代表性配电线路，对线路有功和无功负荷、线路长度等相关参数做相应的基态折算，具体做法在文献[18]中详细描述，在此不赘述。两类线路的基态参数值如表2所示。

表 2 两类线路基态参数值

线路类型	配变平均负载率/%	母线电压/kV	主干线长度/km	平均功率因数
城镇电缆	30	10.3	4	0.90
农村架空	30	10.3	9	0.85

关注同类线路之间线路特征参数的差异，在特征参数变化范围内，取特征参数的极端情况，计算 TPR。如图 3 所示，立方体代表各种线路特征参数构成的可行域，TPR 取最小的极端情况出现在立方体的顶点，假设为图中 A 点，则以 A 点的特征参数，进行 TPR 计算，这样就能保证实际配电线路特征参数在该立方体内时，TPR 指标能满足安全性和经济性要求。当同类配电线路特征参数具有较大范围时，将特征参数的大立方体分成多个小立方体，每个小立方体利用同样的计算方法得到 TPR，可形成更加准确精细的 TPR 指标。

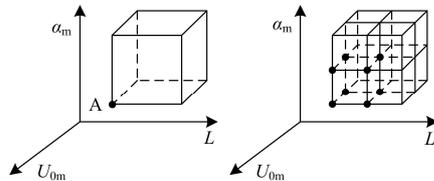


图 3 特征参数差异分析

Fig. 3 Analysis of characteristic parameter differences

4 算例分析

以下选取南方电网典型的 10 kV 电缆线路为实例进行分析。该典型电缆线路的结构如图 4 所示。

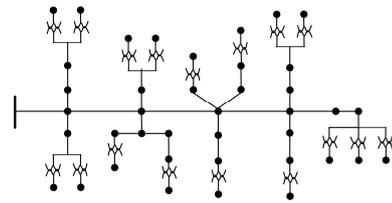


图 4 典型电缆线路拓扑结构
Fig. 4 Topology of the typical cable line

1) 电缆线路 TPR 推荐表计算

根据电气特性，可将该电缆线路归类为电缆线路，该典型电缆线路原态和基态的参数如表 3 所示。

表 3 典型电缆线路参数

模型	最大有功负荷/kW	最大配变平均负载率/%	平均母线电压/kV	配变总容量/kVA	主干线长度/km	平均功率因数
原态	3 314	28.5	10.3	11 630	4.15	0.92
基态	3 489	30	10.3	11 630	4	0.90

考虑同类线路特征参数较大的变化范围，最小配变平均负载率变化范围为 10%~30%，最高首端母线电压变化范围 10.3~10.5 kV，主干线长度为 3~6 km，最高平均功率因数变化范围为 0.85~0.95，将每个参数变化范围进行分段。

电压约束下，电缆线路的 TPR 推荐表如表 4 所示；电流约束下的 TPR 为定值，为 1.08；网损约束下，由于母线平均电压和平均功率因数影响较小，以配变平均负载率和主干线长度两种主要因素形成 TPR 推荐表如表 5 所示。在进行 DG 规划配置时，只考虑安全性下，取电压和电流约束下 TPR 的最小值；在同时考虑经济性下，取电压、电流和网损约束下 TPR 的最小值。

2) 电缆线路 TPR 验算

取南方电网其他两条电缆线路 A、B 进行验证，A、B 两条电缆线路具体参数如表 6 所示。两条电缆线路的 TPR 验算结果与 TPR 推荐表对比如表 7 所示。可见 TPR 验算值与推荐值基本相等，误差在 ±5% 以内，满足规划和工程的误差要求。

表 4 电压约束下电缆线路 TPR 推荐表

U _{0m} /kV	TPR 推荐值	α _m					
		10%~20%			20%~30%		
		L/km		L/km	L/km		L/km
10.3~10.4	cosφ _m	3~4	4~5	5~6	3~4	4~5	5~6
		1.13	0.91	0.78	1.23	1.02	0.88
10.4~10.5	cosφ _m	3~4	4~5	5~6	3~4	4~5	5~6
		1.11	0.89	0.76	1.20	0.98	0.84
10.3~10.4	cosφ _m	3~4	4~5	5~6	3~4	4~5	5~6
		0.77	0.63	0.54	0.87	0.73	0.64
10.4~10.5	cosφ _m	3~4	4~5	5~6	3~4	4~5	5~6
		0.75	0.61	0.52	0.84	0.70	0.61

表 5 网损约束下电缆线路 TPR 推荐表

Table 5 Recommended TPR of cable line under loss constraint

TPR 推荐值		L/km		
α_m		3~4	4~5	5~6
10%~20%	0.46	0.46	0.42	0.28
20%~30%	0.67	0.61	0.61	0.57

表 6 两条电缆线路参数

Table 6 Parameters of two cable lines

线路	最小配变平均负载率/%	最高母线电压/kV	配变总容量/kVA	额定容量/kW	主干线长度/km	平均功率因数
A	13%	10.39	11 175	8 521	5	0.89
B	22%	10.45	8 690	7 343	3.8	0.95

表 7 TPR 验算值和推荐值对比

Table 7 Comparison of TPR calculation values and recommended values

情况	TPR 推荐值	TPR 验算值	误差	
A	电压约束	0.91	0.94	+3.5%
	电流约束	1.07	1.08	+1.1%
	网损约束	0.42	0.43	+2.2%
B	电压约束	0.87	0.91	+4.6%
	电流约束	1.07	1.09	+1.9%
	网损约束	0.61	0.61	0.0%

3) 架空线路 TPR 计算与验算

相同做法下, 可以得到架空线路的 TPR 推荐表。电压约束下, 架空线路的 TPR 的推荐表如表 8 所示。电流约束下, 架空线路的 TPR 为 1.09。网损约束下, 架空线路的 TPR 推荐表如表 9 所示。

表 8 电压约束下架空线路 TPR 推荐表

Table 8 Recommended TPR of overhead line under voltage constraint

特征参数		α_m					
		10%~20%			20%~30%		
		L/km		L/km	L/km		L/km
U_{0m}/kV	$\cos\phi_m$	3~6	6~9	9~12	3~6	6~9	9~12
10.3~	0.80~0.85	0.51	0.44	0.40	0.65	0.61	0.57
10.4	0.85~0.90	0.49	0.42	0.37	0.61	0.55	0.51
10.4~	0.80~0.85	0.40	0.35	0.32	0.53	0.49	0.48
10.5	0.80~0.95	0.38	0.33	0.30	0.49	0.45	0.42

表 9 网损约束下架空线路 TPR 推荐表

Table 9 Recommended TPR of overhead line under loss constraint

TPR 推荐值		L/km		
α_m		3~6	6~9	9~12
10%~20%	0.22	0.22	0.20	0.19
20%~30%	0.33	0.33	0.31	0.29

同样, 取实际架空线路进行验算, TPR 推荐值与验算值的误差也在 $\pm 5\%$ 以内, 满足误差要求, 具体计算不在此重复赘述。

5 结论

本文提出了耐受渗透比的指标, 立足于对配电线路特征的系统分类认识以及配电线路参数与分布式电源 TPR 的关系, 通过基态线路模型得到了配电线路分布式电源 TPR 的推荐表, 指导配电网分布式电源规划。

具体结论如下:

1) 用 TPR 指标衡量配电线路对 DG 的接纳能力更加简明直观, 为本文提出简明直观、具有通用性的 DG 规划方法提供可能;

2) 分析了特征参数对电压、电流和网损的影响, 并得到了 TPR 的极端情况, 是本文提出的基于 TPR 的 DG 规划方法的理论依据。

3) 通过建立不同类型线路的基态模型, 并在特征参数的极端情况下计算耐受渗透比, 既避免了对每条特定配电线路复杂繁琐的建模过程, 又兼顾了同类线路间的差异。

算例表明, 该方法可以直观、有效地进行配电网分布式电源规划, 避免了传统分布式电源规划的复杂困难的建模和求解过程。但该方法是在特征参数的极端情况下进行计算的, 得到的结果偏于保守。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ALEXANDER A, THATHAN M. Modelling and analysis of modular multilevel converter for solar photovoltaic applications to improve power quality[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 78-88.
- [3] 李蕊, 李跃, 郭威, 等. 分布式电源接入对配电网可靠性影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2016-2021.
LI Rui, LI Yue, GUO Wei, et al. Simulation analysis of the influence of distributed generation on the reliability of distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2016-2021.
- [4] 陈旭, 张勇军, 黄向敏. 主动配电网背景下无功电压控制方法综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 143-151.
CHEN Xu, ZHANG Yongjun, HUANG Xiangmin. Review of reactive power and voltage control method in the

background of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 143-151.

[5] 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.

[6] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 32-40.
MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.

[7] 彭显刚, 林利祥, 刘艺, 等. 基于纵横交叉-拉丁超立方采样蒙特卡洛模拟法的分布式电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4077-4085.
PENG Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Optimal distributed generator allocation method based on correlation Latin hypercube sampling Monte Carlo simulation embedded crisscross optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4077-4085.

[8] 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.

[9] CHEN Q, ZHAO X, GAN D. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.

[10] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[11] 曾鸣, 舒彤, 史慧, 等. 兼顾分布式发电商利益的有源配电网规划[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1379-1383.
ZENG Ming, SHU Tong, SHI Hui, et al. An active distribution network planning taking interest of distributed genco into account[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1379-1383.

[12] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63, 128.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63, 128.

[13] 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.

[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] 黄付顺, 王倩, 何美华, 等. 基于综合敏感性分析的时序分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 44-50.
HUANG Fushun, WANG Qian, HE Meihua, et al. Timing distributed power planning based on a comprehensive sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 44-50.

[16] 韩亮, 王守相, 赵歌. 基于区间 TOPSIS 与遗传算法混合的分布式电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 37-42.
HAN liang, WANG Shouxiang, ZHAO GE, et al. Optimal planning of distributed generators based on combination of interval TOPSIS method and genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 37-42.

[17] 唐小波, 徐青山, 唐国庆. 基于“负荷质心”的分布式电源并网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 12-16.
TANG Xiaobo, XU Qingshan, TANG Guoqing. Optimal configuration based on load centroid for distributed generation grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 12-16.

[18] 彭思华, 张勇军, 黄媚. 配电网无功配置基态分析规划方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2646-2652.
PENG Sihua, ZHANG Yongjun, HUANG Mei. A base-state analysis based reactive compensation planning method of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2646-2652.

收稿日期: 2017-04-26; 修回日期: 2017-11-09

作者简介:

张勇军(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制;

林晓明(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网运行优化; E-mail: 411833214@qq.com

张紫珩(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事主动配电网电压控制研究。

(编辑 葛艳娜)