

DOI: 10.7667/PSPC160416

# 基于动态等效电路的含 DG 电力系统电压稳定性分析

颜廷鑫, 刘光晔, 肖白雪, 罗岩菲

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 分布式电源(Distributed generation, DG)接入电网对电力系统电压稳定有一定影响。首先对 DG 接入节点内部系统进行综合动态等效, 将动态等效电路的分析方法应用于含 DG 的电力系统。然后将 DG 视为“负”的负荷, 提出 DG 接入后评价系统静态电压稳定性的广义阻抗模裕度指标。基于广义阻抗模裕度指标, 具体分析了 DG 不同接入方式、出力大小对系统电压稳定性的影响和优化无功补偿的效果。最后通过仿真实验验证了所提方法是研究含 DG 电力系统静态电压稳定性的一种实用和方便的方法。

**关键词:** 电力系统; 动态等效电路; 阻抗模裕度指标; 分布式电源; 电压稳定

## Voltage stability analysis of power system with DGs based on dynamic equivalent circuit

YAN Tingxin, LIU Guangye, XIAO Baixue, LUO Yanfei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Distributed generation connected to grid will have certain impact on voltage stability of power system. At first, the comprehensive dynamic equivalence circuit of internal grid of DG integrating bus is implemented; and on the basis, the method of dynamic equivalent circuit is further extended to the grid-connected DG which is regarded as a “negative” load; and general impedance modulus margin index is put forward to evaluate the system static voltage stability. The impacts of the output and their different installation methods of DG on system voltage stability and optimization of reactive power compensation are researched based on general impedance modulus margin index. At the last, the proposed method is proved to be a practical and convenient method that is suitable to study the static voltage stability of grid-connected DG.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577053).

**Key words:** power system; dynamic equivalent circuit; impedance modulus margin index; distributed generation; voltage stability

## 0 引言

分布式电源作为缓解电力紧张的重要手段, 以其环保、灵活和高效等特点成为众多学者研究的热点<sup>[1-3]</sup>。我国分布式发电技术发展迅速, DG 正从补充能源向替代能源过渡, 不久的将来应用前景将会更加广阔。

分布式电源大规模接入电网, 一定程度上会对电力系统运行各方面产生影响<sup>[4-6]</sup>, 其中电压稳定是一个非常重要的方面<sup>[7-9]</sup>。DG 一般与配电网并网运行, 文献[10]从放射状链式配电网出发, 重点研究了 DG 接入对电网电压分布的影响, 并结合具体案

例给出了电压调整和无功优化方法。文献[11]分析了两类传统配电网的静态电压稳定性指标(L指标和V-I特性指标)在含 DG 配电网中的应用, 并基于戴维南等效提出含 DG 配电网静态电压稳定性的指标 $S_{VS}$ 来研究不同类型 DG 并网带来的影响。文献[12]基于改进的配电网电压稳定指标 L, 通过实例计算分析了不同类型的分布式电源及其在配电网中的不同安装位置对系统静态电压稳定性的影响, 并指出该指标判断“系统在当前运行状态下还能承受多大的负荷增长”时变得十分困难。

DG 大规模接入配电网后, 势必会引起配电网潮流大小和方向发生变化, 对配网静态电压稳定性产生影响, 从而也会对系统的电压稳定带来不可避免的影响。文献[8]提出利用灵敏度分析方法来定量

分析 DG 出力、接入位置对系统电压的影响。从 DG 接入配电网势必会对系统电压稳定性造成影响的角度出发<sup>[13]</sup>, 在文献[14]的基础上, 本文将动态等效电路的分析方法用于含 DG 系统电压稳定性分析。将 DG 视为“负”的负荷, 对接入 DG 的负荷节点内部进行综合动态等效, 定义广义阻抗模裕度指标分析 DG 不同接入方式及系统整体负荷变化对系统电压稳定性的影响。将广义阻抗模裕度指标按大小排序, 可得系统最薄弱节点以及 DG 的适合接入点, 对电网运行人员具有一定的指导意义。

## 1 电力系统动态等效电路分析方法

电力系统动态等效电路分析方法主要用于计算负荷极限功率和电压稳定临界点, 建立在潮流方程上, 基于一般非线性方程极值分析原理, 推导出系统负荷功率取极大值的必要条件。推导过程如下。

从系统任一负荷节点看进去, 可以等效为如图 1 所示的电源-负荷非线性交流电路。

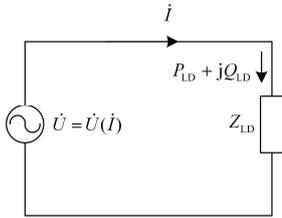


图 1 电力系统非线性等效电路

Fig. 1 Non-linear equivalent circuit of the power system

电力系统的电源或负荷采用注入功率模型, 为了简化分析, 不再区分注入负荷节点功率的实际方向, 将功率方程式写成平方的形式

$$S_{LD}^2 = P_{LD}^2(\lambda) + Q_{LD}^2(\lambda) = U^2 I^2 \quad (1)$$

式中:  $S_{LD}$ 、 $P_{LD}$ 、 $Q_{LD}$  分别是负荷节点的视在功率、有功和无功功率;  $\lambda$  为负荷功率因子, 即控制负荷功率变化的因数;  $U$ 、 $I$  分别是对应的负荷节点电压、电流。

式(1)对  $\lambda$  求导, 根据复合函数求导的链式法则, 并令

$$\frac{d(S_{LD}^2)}{d\lambda} = 2UI^2 \left( \frac{dU}{dI} + \frac{U}{I} \right) \frac{dI}{d\lambda} = 0 \quad (2)$$

可得  $S_{LD}^2$  取极值的必要条件是

$$-\frac{dU}{dI} = \frac{U}{I} \quad (3)$$

式(3)中, 电压模  $U$  和电流模  $I$  恒为正, 其比值  $Z_{LD} = U/I$  是负荷静态等效阻抗模。相应的, 定义系统综合动态等效阻抗模为

$$|Z_S| = -\frac{dU}{dI} \quad (4)$$

由式(3), 负荷视在功率平方  $S_{LD}^2$  取极值的必要条件为

$$|Z_{LD}| = |Z_S| \quad (5)$$

由上可知, 式(5)既是非线性电力系统传输功率达到极大值的必要条件, 也是电力系统电压稳定临界点的判据。该判据与潮流雅可比矩阵奇异是等价的, 因此可以推广到大规模电力系统。

由系统电压稳定判别式(5), 定义评价系统静态电压稳定性的阻抗模裕度指标为

$$\mu_z = \frac{|Z_{LD}| - |Z_S|}{|Z_{LD}|} \quad (6)$$

显然, 当负荷为空载时, 因为  $|Z_{LD}| = \infty$ , 则负荷阻抗模裕度指标  $\mu_z = 1$ ; 当负荷增大到电压稳定临界状态时, 因为  $|Z_{LD}| = |Z_S|$ , 则负荷的阻抗模裕度指标  $\mu_z = 0$ 。据此, 可以通过计算负荷阻抗模裕度的大小来判断负荷节点电压稳定性强弱。

系统综合动态等效电路如图 2 所示。

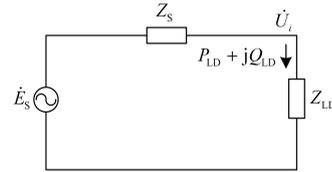


图 2 系统综合动态等效电路

Fig. 2 Comprehensive dynamic equivalent circuit of the power system

由图 2 易得, 综合动态等效电动势为

$$\dot{E}_S = \dot{U} + Z_S(-\hat{S}) / \hat{U} \quad (7)$$

由以上分析, 可方便地求出负荷节点的各项综合动态等效参数, 进而可由式(6)评价系统当前电压稳定水平。

## 2 含 DG 系统电压稳定分析

### 2.1 DG 接入后的电压稳定性评估

如图 3(a)所示, 在节点  $i$  处接入 DG, DG 注入功率为  $P_{DG} + jQ_{DG}$ 。考虑到内部电网结构的复杂性, 从节点  $i$  看进去的综合动态等效电路如图 3(b)所示。  $Z_S$  为系统综合动态等效阻抗,  $\dot{E}_S$  为相应的综合动态等效电动势, 负荷节点电压  $\dot{U}_i$  设为参考电压。

利用式(6)阻抗模裕度指标可方便地分析系统负荷节点的电压稳定裕度。当 DG 接入电网负荷节点后, 其注入功率可看成是“负”的负荷。此时系统负荷节点的功率可表示为

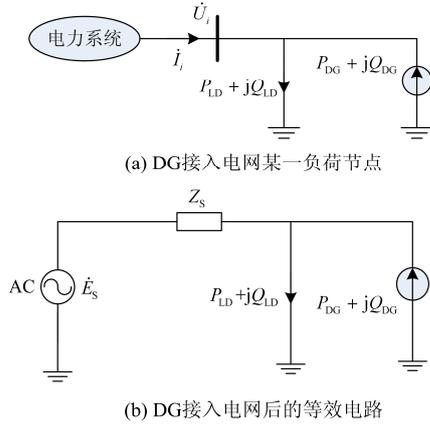


图3 DG接入电网的综合动态等效模型

Fig. 3 Comprehensive dynamic equivalent model of the bus integrating DG

$$\begin{cases} \Delta P = P_{LD} - P_{DG} \\ \Delta Q = Q_{LD} - Q_{DG} \end{cases} \quad (8)$$

则复功率有如下关系式

$$\Delta S^2 = \Delta P^2 + \Delta Q^2 = U'^2 I'^2 \quad (9)$$

式中,  $\Delta S$ 、 $U'$ 、 $I'$  分别为接入 DG 后负荷节点的视在功率, 节点电压和负荷电流。

仿照式(1)一式(6)的过程, 可得 DG 接入电网后评价系统静态电压稳定性的广义阻抗模裕度指标

$$\mu'_z = \frac{|Z'_{LD}| - |Z'_s|}{|Z'_{LD}|} \quad (10)$$

式中,  $\mu'_z$ 、 $Z'_{LD}$ 、 $Z'_s$  分别为接入 DG 后负荷广义阻抗模裕度、静态等值阻抗、综合动态等值阻抗。广义阻抗模裕度指标  $\mu'_z$  可体现出 DG 接入电网后对系统电压稳定性的影响, 反映了当前电压稳定水平到电压稳定临界点的距离。

$$\mu'_z = \min(\mu'_{1z}, \mu'_{2z}, \dots, \mu'_{mz}) \quad (11)$$

式中:  $m$  为系统负荷节点数;  $\mu'_z$  对应系统中最薄弱节点的阻抗模裕度指标。当系统发生电压崩溃时, 一定是从最薄弱节点开始的。因此, 根据  $\mu'_z$  的大小可判断系统电压稳定的程度。

为衡量 DG 接入负荷节点后系统电压稳定水平的改善程度, 定义系统阻抗模裕度指标增长率。

$$\varepsilon = \frac{\mu'_z - \mu_z}{\mu_z} \quad (12)$$

式中,  $\mu_z$  和  $\mu'_z$  分别为未接入 DG 和接入 DG 后的系统阻抗模裕度指标。该指标可整体评价负荷节点接入 DG 后对系统静态电压稳定性的影响程度。

## 2.2 计算方法

直角坐标下, 基于连续潮流法进行潮流计算。连续潮流法的参数化是区别常规潮流算法的核心,

局部参数化后的负荷及发电机功率如式(13)。

$$\begin{cases} P_{Li} = P_{Li0} + \lambda k_{pi} \\ Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda k_{qi} \\ P_{Gi} = P_{Gi0} + \lambda k_{gi} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{Li0}$ 、 $Q_{Li0}$ 、 $P_{Gi0}$  分别为负荷的初始有功、无功功率和发电机初始有功功率; 系数  $k_{pi}$ 、 $k_{qi}$ 、 $k_{gi}$  分别为节点  $i$  的负荷有功、无功、发电机有功增长系数;  $\lambda$  为负荷功率因子。

加入负荷参数后的连续潮流方程

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{D} = 0 \\ \mathbf{x}_k^j - \mathbf{x}_k^{j-1} = \Delta \mathbf{s} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{D}$  为负荷及发电机增长向量;  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  为原潮流方程; 上标  $j$  为待求点;  $\mathbf{x}_k$  为备选参数的状态变量。

分别计算接入 DG 后系统各节点的广义阻抗模裕度指标, 根据该指标的大小, 可分析 DG 接入负荷节点后对系统静态电压稳定性的影响。

## 3 仿真分析

选取 IEEE 标准系统来验证本文所提电压稳定指标的有效性。验证方法主要是在系统某些节点处接入 DG, 并改变 DG 出力来分析讨论对系统电压稳定的影响程度。

### 3.1 IEEE14 节点系统测试

采用文献[14]的负荷增长策略, 即系统负荷按同步功率扰动。在初始负荷状态下, IEEE14 节点系统各负荷节点的阻抗模裕度指标计算结果如图 4 所示。

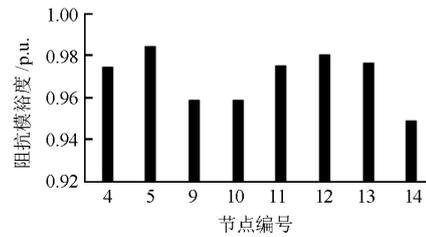


图4 初始状态下各节点的阻抗模裕度

Fig. 4 Generalized impedance modulus margin of different nodes under initial state

由图 4 可知, 节点 14 的阻抗模裕度指标最小, 说明该节点的电压稳定性最弱, 而节点 5 的电压稳定水平最高。参考 IEEE14 节点系统的网络结构图, 节点 5 离电源最近, 故维持在较高的电压稳定水平, 节点 14 则正好相反。在负荷连续增大的过程中, 节点 14 最先发生电压崩溃, 全网的电压崩溃点也是从

该节点开始的。

连续增大系统负荷功率, 可以得到各节点阻抗模裕度指标的变化趋势。选取阻抗模裕度最大的节点 5 和阻抗模裕度最小的节点 14, 追踪这两个负荷节点的  $\mu_z$  变化过程, 选取 15 个迭代计算关键点, 绘制的阻抗模裕度变化曲线如图 5 所示。

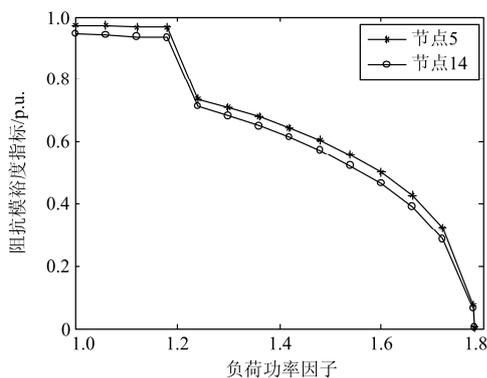


图 5 阻抗模裕度随负荷功率因子的变化曲线

Fig. 5 Change curve of generalized impedance modulus margin along with the power factor

分析图 5, 随着负荷水平的增加, 两节点的阻抗模裕度指标均逐渐减小, 在极限功率点附近, 阻抗模裕度指标接近于零。这说明, 系统负荷功率越大, 阻抗模裕度指标值越小, 电压稳定性水平越弱。

本文在电压稳定性水平居中的节点 11 处安装 1.5 MW 的 DG, 分别研究以下三种情形下 DG 出力对系统电压稳定性的影响: (1) DG 出力为 0, 即不接入 DG; (2) DG 出力为额定容量的 50%; (3) DG 按额定功率出力。在负荷功率因子  $\lambda=1.3$  的负荷水平下, 三种情形 DG 接入系统后, 各节点广义阻抗模裕度如表 1 所示。

表 1 三种 DG 接入方式下各节点的广义阻抗模裕度

Table 1 Generalized impedance modulus margin of different nodes under three DG connection methods

节点	不接入 DG/p.u.	DG 出力 50%/ p.u.	DG 额定 出力/p.u.	增长率 $\varepsilon$ /%
4	0.7701	0.7787	0.7874	2.25
5	0.7883	0.7966	0.8050	2.12
9	0.7087	0.7192	0.7301	3.02
10	0.7030	0.7139	0.7252	3.16
11	0.7108	0.7219	0.7334	3.18
12	0.7090	0.7204	0.7322	3.27
13	0.7029	0.7141	0.7256	3.23
14	0.6837	0.6951	0.7069	3.40

注:  $\varepsilon$ 为 DG 额定出力时的增长率。

分析表 1, 在系统同一负荷水平下, 随着 DG 出力的增加, 系统各节点的阻抗模裕度值逐渐增大,

电压稳定性增强。且系统薄弱节点的电压稳定性得到较大提高, 这是由于 DG 的接入优化了系统潮流分布, 提升了薄弱点的电压支撑能力。当 DG 出力波动性较大时, 在一定范围内随着 DG 出力的增加, 对系统薄弱节点电压稳定性的改善程度也逐渐增加。

DG 可灵活的接入电网, 这是相对传统同步发电机的一个明显优势。为比较 DG 集中接入和分散接入对系统电压稳定性的影响, 将 1.5 MW 的 DG 分散接入到电压稳定性水平较低的节点 9、节点 10 和节点 14 处, 且三个节点等比例分配功率。这两种不同接入方式对各节点的电压改善效果如图 6 所示。

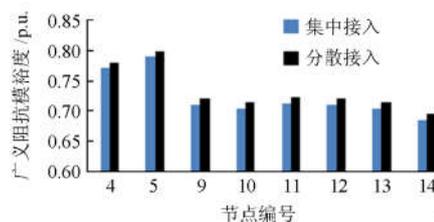


图 6 两种不同接入方式各节点广义阻抗模裕度

Fig. 6 Generalized impedance modulus margin of different nodes under two DG connection methods

由图 6 可知, 在 DG 接入总容量一定的情况下, 分布式接入比集中接入 DG 对系统电压稳定性的改善程度更为明显。在未来大规模接入分布式发电的情形下, 有利于优化系统潮流, 减少常规机组的有功出力, 从而有效改善系统的静态电压稳定性。

### 3.2 IEEE30 节点测试系统

在 IEEE30 节点系统某一运行状态下, 1.5 MW 容量的 DG 接入某一节点并改变 DG 出力探究系统节点电压所受影响程度, 计算结果如表 2。

Case0 在节点 18 接入 DG 计算的广义阻抗模裕度; Case4 为在 DG 未接入电网时的初始阻抗模裕度, 此时系统最薄弱节点为 26 号; Case1 为在电压稳定性较强的节点 7 接入 DG 计算的广义阻抗模裕度; Case2 为在电压稳定性较弱的节点 26 接入 DG 计算的广义阻抗模裕度; Case3 为节点 26 接入 DG, 且 DG 的注入功率为 Case2 的不同倍数时的广义阻抗模裕度(表中仅列出 2 倍的计算数据)。分析表 2 可得如下结论。

1) 在某一负荷节点接入 DG 后, 该节点的电压稳定性明显改善, 系统整体电压稳定性也有一定程度的提高。由式(12)计算 Case1、Case2、Case3 情况下系统阻抗模裕度指标增长率:  $\varepsilon_1 = -0.32\%$ 、 $\varepsilon_2 = 2.42\%$ 、 $\varepsilon_3 = 1.95\%$ 。数据表明: 在系统电压薄弱点接入 DG, 会明显提高系统电压稳定性。

表 2 IEEE30 节点系统的广义阻抗模裕度  
Table 2 IEEE30 bus system generalized impedance  
modulus margin values

节点	阻抗模裕度指标/p.u.				
	Case0	Case1	Case2	Case3	Case4
3	0.9582	0.9535	0.9525	0.9515	0.9469
4	0.9525	0.9477	0.9466	0.9454	0.9408
7	0.9695	0.9930	0.9669	0.9668	0.9644
10	0.9011	0.8980	0.9204	0.9248	0.9407
12	0.9064	0.9036	0.9206	0.9310	0.9352
14	0.8907	0.8879	0.9069	0.9183	0.9238
15	0.8867	0.8837	0.9015	0.9074	0.9167
16	0.8957	0.8925	0.9113	0.9201	0.9274
17	0.8940	0.8909	0.9123	0.9178	0.9315
18	0.8781	0.8750	0.8944	0.9957	0.9114
19	0.8766	0.8735	0.8938	0.8999	0.9118
20	0.8818	0.8787	0.8996	0.9058	0.9181
21	0.8875	0.8844	0.9086	0.9106	0.9308
23	0.8779	0.8749	0.8951	0.8984	0.9129
24	0.8755	0.8726	0.8968	0.8955	0.9192
26	0.8727	0.8699	0.9868	0.8897	0.9915
29	0.8907	0.8880	0.9386	0.9055	0.9919
30	0.8772	0.8746	0.9250	0.8919	0.9783
系统	0.8727	0.8699	0.8938	0.8897	0.9114

2) 比较 Case2 和 Case4 两种情况, 在同一节点接入不同出力的 DG, 对系统静态电压稳定性的影响也不同。一定范围内, DG 注入节点功率越大, 对系统静态电压稳定性的改善越显著, 这与 IEEE14 节点测试系统得到的结论是一致的。

3) 结合 IEEE30 节点系统的网络结构图, 距离 DG 接入处较近的节点电压稳定性改善明显; 而距离 DG 接入处较远的节点, 有可能受到负面影响。例如, Case3 在节点 18 处接入 DG 后, 距离较近的节点 15、19、20 等电压均有明显提升; 而距离相对较远的节点 3、4、7 电压稳定性则稍有降低。

4) DG 接入位置不同, 系统电压薄弱节点也会发生变化。例如, Case0 节点 26 电压稳定水平最低, 而 Case1 和 Case2 分别在节点 7 和节点 26 接入 DG 后, 系统电压薄弱节点分别变为节点 24 和节点 19。随着系统整体负荷水平的增加, 系统广义阻抗模裕度指标不断减小, 电压稳定性逐渐降低, 如图 7 所示。在接近电压稳定临界点时, 广义阻抗模裕度指标与负荷功率因子依然近似成线性关系, 这说明应用广义阻抗模裕度指标能够很好地反映系统当前运行状态到电压稳定临界点的距离。

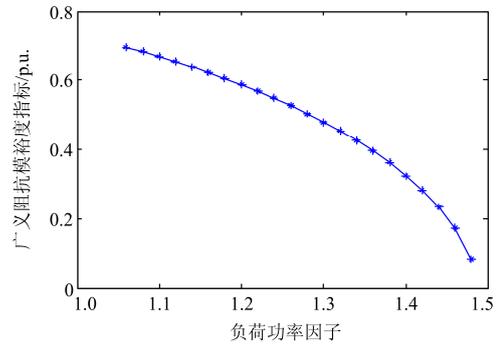


图 7 广义阻抗模裕度随 $\lambda$ 变化曲线

Fig. 7 Change curve of generalized impedance modulus margin along with load power factor

## 4 结论

本文将电力系统动态等效电路的分析方法推广到含 DG 系统的静态电压稳定性分析中, 提出评价含 DG 系统电压稳定性的广义阻抗模裕度指标, 并以此指标量化 DG 对系统电压稳定性的影响。分析仿真结果, 可得到以下结论。

1) 分析评价系统静态电压稳定性的阻抗模裕度指标, 将阻抗模裕度指标按大小进行排序, 可以确定系统电压稳定最薄弱节点。将动态等效电路的分析方法推广到含 DG 系统, 用广义阻抗模裕度指标分析 DG 接入对系统电压稳定性的影响, 为进一步分析含 DG 系统的电压稳定性提供了量化指标。

2) DG 经合理规划接入电网, 在一定程度上提高了系统电压稳定性, 系统静态电压稳定性会随着 DG 出力增加而增强; 分散接入比集中接入 DG, 对系统的电压改善程度更为明显。当有多个 DG 接入时, 可根据节点广义阻抗模裕度指标的大小, 按从小到大的顺序依次接入。因此, 在系统电压薄弱节点接入适当容量的 DG, 对提高系统静态电压稳定性最有意义。

## 参考文献

- [1] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.  
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75.
- [2] 陈海东, 庄平, 夏建矿, 等. 基于改进萤火虫算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 149-154.  
CHEN Haidong, ZHUANG Ping, XIA Jiankuang, et al. Optimal power flow of distribution network with

- distributed generation based on modified firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 149-154.
- [3] 谢永涛, 贾嵘, 董开松, 等. 交流微网整体建模及仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6):101-107.  
XIE Yongtao, JIA Rong, DONG Kaisong, et al. Modeling and simulation of an AC micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 101-107.
- [4] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8-14.  
LI Dongdong, LIANG Zichao, ZHOU Yuqi. Transient voltage stability assessment of receiving end grid incorporating with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 8-14.
- [5] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [6] 施海泉, 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 Haiquan, 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.
- [7] 周红婷, 宋玮. 计及动态无功控制影响的大规模风电汇集地区电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 13-18.  
ZHOU Hongting, SONG Wei. Analysis on voltage stability in large-scale wind farms integration area considering impact of dynamic reactive power control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 13-18.
- [8] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.  
LI Bin, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88.
- [9] 唐一铭, 顾文, 范立新, 等. 风电场 SVG 测试方法研究与结果分析[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 15-19.  
TANG Yiming, GU Wen, FAN Lixin, et al. Test method study for SVG in wind farm and result analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 15-19.
- [10] 杨广杰, 郑华. 含分布式电源的配电网电压无功优化问题研究[J]. 现代电力, 2012, 29(2): 27-31.  
YANG Guangjie, ZHENG Hua. Research on the voltage and reactive power optimization control of distribution system with distributed generations[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(2): 27-31.
- [11] 李云亮, 杨绍勇, 马涛, 等. 含分布式电源的配电网静态电压稳定性判别方法的研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(25): 45-49.  
LI Yunliang, YANG Shaoyong, MA Tao, et al. Research on the static voltage stability discrimination method of distribution network containing distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(25): 45-49.
- [12] 陈海淼, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.  
CHEN Haimiao, DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu. Impacts of distributed generation on steady state voltage stability of distribution system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [13] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响[J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.  
QIAN Kejun, YUAN Yue. Distributed generation technology and its impact on power systems[J]. Relay, 2007, 35(13): 25-29.
- [14] 刘光晔, 施海亮, 杨以涵. 非解析复变电力系统电压稳定的动态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 50-56.  
LIU Guangye, SHI Hailiang, YANG Yihan. Comprehensive dynamic analysis method for power system static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 50-56.

收稿日期: 2016-03-25; 修回日期: 2016-05-28

作者简介:

颜廷鑫(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 1135187365@qq.com

刘光晔(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析与控制方面的研究工作; E-mail: liuguangye@hnu.edu.cn

肖白雪(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: 724702960@qq.com

(编辑 张爱琴)