

DOI: 10.7667/PSPC201621

## 利用风电分散接入提升配电网末端电压技术研究及工程示范

王佳颖<sup>1</sup>, 冯利民<sup>2</sup>, 朱洁<sup>3</sup>, 李涵深<sup>4</sup>, 付海艳<sup>5</sup>, 杨松<sup>2</sup>

(1. 国网通用航空有限公司, 北京 102209; 2. 全球能源互联网集团有限公司, 北京 100031; 3. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100032; 4. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 5. 中国电力工程顾问集团东北电力设计院有限公司, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 配电网线路末端电压低是影响局部地区供电质量的瓶颈。首先以辐射型配电网为例, 分析了配网线路末端电压低的原因, 指出配电线路末端电压低不完全是无功不足所导致, 其传输有功也将导致末端电压下降。结合吉林省风能资源丰富的特点, 提出了基于风电分散接入的配电网末端电压提升方案。该方案将风电机组相对集中后经升压站升压到 66 kV 接入到高压配电线路中段, 能够有效提升配电线路末端电压。选取吉林省某风电场进行试点, 证实了该方案具备实用价值, 为更好地提升低压配电网供电能力做出有益尝试。

**关键词:** 分散接入; 风电; 低压配网; 供电; 示范

### Research on the novel technology to raise the voltage of the distribution system based on the distributed wind turbines and the demonstration project

WANG Jiaying<sup>1</sup>, FENG Limin<sup>2</sup>, ZHU Jie<sup>3</sup>, LI Hanshen<sup>4</sup>, FU Haiyan<sup>5</sup>, YANG Song<sup>2</sup>

(1. State Grid General Aviation Company Limited, Beijing 102209, China; 2. Global Energy Interconnection Group Co., Ltd., Beijing 100031, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Corporation Electric Power Research Institute, Beijing 100032, China; 4. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 5. Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Changchun 130021, China)

**Abstract:** The low terminal voltage of distribution network is the bottleneck which affects the quality of power supply in local area. First, taking the radial distribution network as an example, this paper analyzes the reasons of low voltage at the end of the distribution line, points out that the low terminal voltage of distribution line is not entirely caused by the lack of reactive power, the transmission active power also leads to terminal voltage drop. Then, combined with the characteristics of wind energy resources in Jilin Province, a scheme is proposed which can raise the voltage at the end of the distribution line based on the distributed wind turbines. The main idea of this scheme concentrates the wind turbines output to the booster station, and then raises the voltage to 66 kV and connects to the middle section of the high voltage distribution line, which can effectively improve the terminal voltage of the distribution lines. The scheme is of practical value and can preferably improve power supply capacity of low-voltage distribution system, which is verified by a demonstration project of a wind plant in Jilin province.

**Key words:** distributed integrating; wind power; low-voltage distribution system; power supply; demonstration

## 0 引言

低压配电网是电网向用户供电的最后一个环节, 其电压支撑能力关系重大。可是由于历史原因, 我国配电网建设相对滞后, 网架相对薄弱。因此, 随着家电产品的广泛普及, 偏远地区, 如广大农村, 在用电的高峰时段都会出现电压过低的情况, 少数地区的低电压现象还特别突出, 甚至无法满足用户

的正常用电需求<sup>[1]</sup>。

有文献提出在配网并入分布式电源能改变电压分布特性。文献[2-3]研究了含风力发电的无功优化模型, 介绍了包含分布式发电的配电网无功优化技术, 但是, 由于配电网输电阻抗大, 网络传输的有功和无功都会引起电压降落, 因而传统的基于并列电容器的无功补偿方法不能有效解决低电压问题。文献[4]建立了分布式风电源和联络线投资综合

最小、网损最小以及供电可靠性最佳的多目标规划模型，应用非劣排序遗传算法优化得到分布式风电源的位置、容量和联络线的位置，但对于改善末端电压问题并没有得到认真考虑。文献[5]总结了近年来主动配电网的相关研究成果，主要包括：主动配电网的控制方式、分布式电源的优化规划、电压管理、电动汽车的主动管理、需求侧管理、主动配电网的保护和故障定位等，并进一步提炼了为主动配电网提供支撑的相关新兴技术，在文献[6-20]中也有相关描述，为分布式电网并网后的运行有借鉴价值。

本文总结了以上文献的不足之处，借鉴了相关经验，提出了在配电网末端并入风电机组，大力减轻配电线路传输电力，以此提升线路末端电压的切实可行的实施方案，并在示范工程中得到了应用。

### 1 配电网现状分析

网架结构薄弱，转供能力不足。有些配电网线路本身负荷较重或线径较小，导致联络能力不足，造成在事故处理大修、改造等工作中停电时间较长，降低了线路应有的供电能力；部分 10 kV 线路未形成手拉手或环网，不能互带。

10 kV 电网“卡脖子”和轻载问题并存。目前配电网负荷在各配电线及变电站之间分布不均，致使部分配电线路重载、过载，有的线路负荷较轻。过大的负载，使得具备联络功能的线路随着负荷的增长会逐步失去互带能力。失去互带能力意味着不能通过调整运行方式来调压。

配电网“低电压”问题突出。由于线路长，供电半径大，线路末端电压低，严重影响了部分配电网的正常生产生活供电。

县域电网装备水平偏低。部分县域电网的设备由于当时设备选型低、技术不成熟，生产质量不过关，经过十几年左右的运行后逐渐暴露，诸如：元件绝缘老化、操作失灵、壳体锈蚀、设备无备件等问题，存在严重的安全隐患。部分设备运行年限长，健康水平低，影响安全经济运行。

### 2 风电分散接入配电网的工作原理

配电网中上述问题与低电压的现状息息相关，这些问题通过常规补偿手段难以解决。本文提出的风电分布式接入治理低电压的方式，就是将相对小型的风力发电场(一般 50 MW 以下)分散布置在用户(负荷)现场或用户附近的接入方式，减轻配电线路传输电力，从而抬升末端电压。风电机组的分布式接入位置灵活与分散的特点极好地适应了低压配

网的电力需求与资源分布，延缓了输、配电网升级换代所需的巨额投资，同时它与大电网互为备用使供电可靠性也得以改善。

以放射状链式结构为例说明风电分散接入低压配电网抬升末端电压的工作原理。图 1 所示为典型的辐射式高压配电网。图中  $U_1$ 、 $U_2$  为 66 kV 电压， $U_4$ 、 $U_{L1}$ — $U_{Ln}$  为 10 kV 电压。当然，通常 A 变电站会有许多条出线，这里为了简化，其余配电线路的负荷配置情况未列出。图 1 中， $U_1$  靠近系统，电压保持额定运行。但由于高压配电线路 AB 段、配电变压器阻抗和低压线路  $l_4$  段电阻的存在，用户侧电压  $U_{L1}$ — $U_{Ln}$  会经常过低。为了解决电压  $U_{L1}$ — $U_{Ln}$  过低的问题，可以在负荷附近就近并入分布式电源，从而减小高压配电线路、配电变压器和低压线路传输的功率，起到电压支撑的作用，同时还能降低线损。之所以选择就近并入分布式电源，是因为大规模开发的风电场一般会接入 220 kV 系统。显然，将风电机组集中接入 220 kV 系统后，配电网消耗功率还是需要通过高压配电网、配电变压器和低压配电线路传递，风电机组出力不能起到低压侧的电压支撑作用。

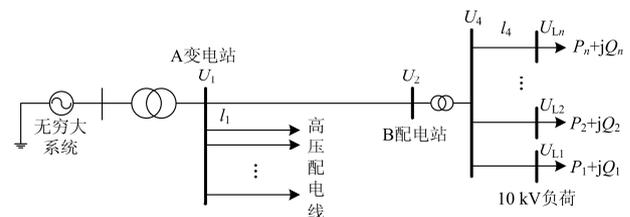


图 1 典型的辐射式配电网

Fig. 1 A typical radial distribution system

#### 2.1 分散接入的两种方式

本文给出两种分布式接入方案。

一种是图 2 所示，将  $n$  台风电机组集中汇流，在升压站升压到 66 kV 后并入到 66 kV 系统，升压后的接入线路可以是直接接入到变电站，也可以“T”接或者是“π”接到 66 kV 线路中，图 2 所示为“T”接形式。图中  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  为 66 kV 电压， $U_4$ 、 $U_{L1}$ — $U_{Ln}$  为 10 kV 电压。这种接入模式下，线路 AT 段引起的压降将会被弥补，电压  $U_2$  将会有所提升，相应的， $U_{L1}$ — $U_{Ln}$  会有所改善。

另外一种方案如图 3 所示，是将风电机组在低压配电线末端接入负载，企图平衡负荷，减轻配电网线路传输功率，从而配网线路压降，提升配网末端电压  $U_4$ 、 $U_{L1}$ — $U_{Ln}$ 。

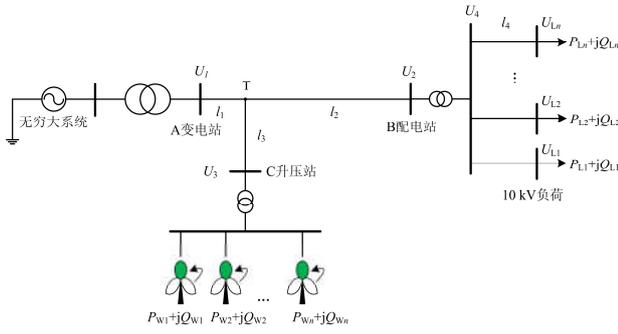


图 2 风电机组通过 66 kV 接入负荷附近的并网方式  
Fig. 2 Integrated method of the wind power to the load nearby through 66 kV power line

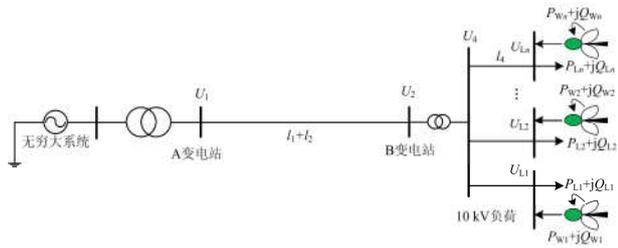


图 3 风电分散接入低压馈电线末端示意图  
Fig. 3 Diagram of distribution network with wind power integrated to its terminal dispersedly

## 2.2 工作原理

图 2 所示电路的等效参数如图 4 所示。设定  $\dot{U}_1 = \dot{U}_3 = U \angle 0^\circ$ ，为了分析问题方便，假设负荷都完全相同。则有，

$$\dot{U}_{L_i} = \dot{U}_T - \frac{\left( \sum_i P_{L_i} + P_{Loss} \right) \left( r_2 + r_i + \frac{r_4}{n} \right) - j \left( \sum_i Q_{L_i} + Q_{Loss} \right) \left( x_2 + x_i + \frac{x_4}{n} \right)}{\dot{U}_T} \quad (1)$$

式中： $\dot{U}_{L_i}$  为第  $i$  条线路的电压值； $\dot{U}_T$  为方式 2 中 T 点电压值； $P_{L_i}$  为第  $i$  条线路有功功率； $P_{Loss}$  为线路有功功率损耗； $r_2$  为 T 点至 B 配电站的线路电阻； $r_i$  为 B 配电站至 10 kV 的线路电阻； $r_4$  为 10 kV 线路始端至负荷端的电阻； $n$  为风机接入数量； $Q_{L_i}$  为第  $i$  条线路无功功率； $Q_{Loss}$  为线路无功功率损耗； $x_2$  为 T 点至 B 配电站的线路电抗； $x_i$  为 B 配电站至 10 kV 的线路电抗； $x_4$  为 10 kV 线路始端至负荷端的电抗。

研究图 2 所示方式风电功率波动对负载电压的影响  $S_1$ ，定义

$$S_1 = \frac{\Delta \dot{U}_{L_i}}{\Delta P_{W_i}} \quad (2)$$

式中： $\Delta \dot{U}_{L_i}$  为第  $i$  条线路接入风机后电压值增量； $\Delta P_{W_i}$  为第  $i$  条线路接入风机后有功功率增量。

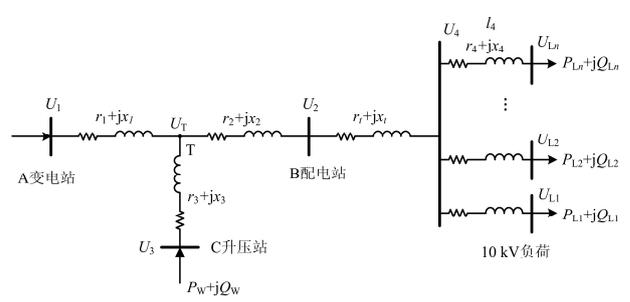


图 4 图 2 所示方式等效电路图  
Fig. 4 Equivalent circuit of Fig. 2

同理，图 3 所示接入方式的等效电路图如图 5 所示。

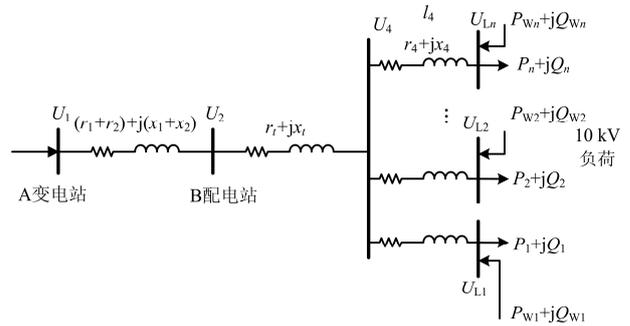


图 5 图 3 所示方式等效电路图  
Fig. 5 Equivalent circuit of Fig. 3

分析图 5 所示电路，计算  $U_{L_n}$  随风电机组出力的变化，可得

$$\dot{U}_{L_n} = \dot{U}_4 - \frac{(P_{L_n} - P_{W_i})r_4 + (Q_{L_n} - Q_{W_i})x_4}{n\dot{U}_4} - j \frac{(P_{L_n} - P_{W_i})x_4 - (Q_{L_n} - Q_{W_i})r_4}{n\dot{U}_4} \quad (3)$$

式中： $P_{W_i}$  为第  $i$  条线路接入风机的有功功率； $Q_{W_i}$  为第  $i$  条线路接入风机的无功功率； $\dot{U}_4$  为 10 kV 线路始端电压值。

同理，研究图 3 所示方式风电功率波动对负载电压的影响  $S_2$ ，定义

$$S_2 = \frac{\Delta \dot{U}_{L_i}}{\Delta P_{W_i}} \quad (4)$$

采用如表 1 所示的运行数据，对式(2)和式(4)中的值的实部进行计算，针对  $P_w$  的取值从 0~1.5 MW 进行扫描，可以得到两种接入方案下的负荷末端电压受风电出力变化的影响情况，如图 6 曲线所示，单位为 kV/MW。曲线中实线和虚线所示分别为图 2 和图 3 所示方案的“电压-功率”变化曲线。

值得指出的是，计算出的电压值都是折算到了高压侧，其他电压等级可以按变比折算回原电压等级。

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

$r_1$	$x_1$	$r_2$	$x_2$	$r_4$	$x_4$	$r_t$	$x_t$
7.7	20.592	3.322	8.888	6.3	3.95	1.99	4.1

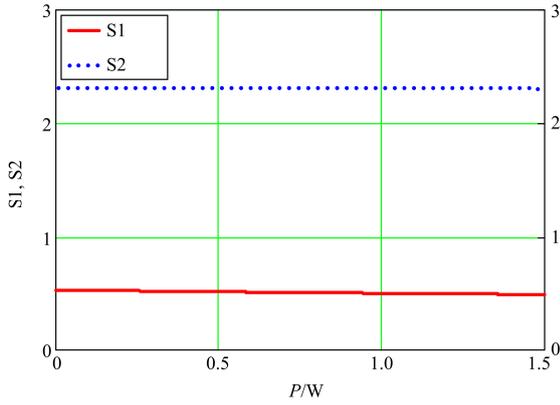


图 6 两种方式下风电功率波动对负荷末端电压的影响率

Fig. 6 Influence ratio of disperse wind power on voltage fluctuation rate with different integration methods

从图 6 中曲线可以得到如下结论:

1) 配电网中接入风电机组能显著抬升配网末端电压, 电压抬升效果随接入地点不同而有所不同。

2) 图 2 所示方式, 将风电机组相对集中接入 66 kV 电压等级配电网, 单位风电功率接入后, 对电压的抬升作用比图 3 所示方式小, 前者为后者的 1/3 左右。

3) 图 2 所示方式, 单位功率的风电出力波动带来负荷末端的电压波动相比较图 3 所示方式也小。而过大的电压波动会给电力用户造成不必要的损失。

因此, 综合比较好的电压抬升效果和较低的电压波动性, 我们可以采取图 2 所示接入系统方式。

### 2.3 对配电线路线损的影响

风电机组分散接入配电网中, 能大幅度降低馈线的损耗。图 2 所示系统中, 馈线线损可以表述为

$$\Delta S = \frac{P^2 + Q^2}{U_2^2} \cdot (R_0 l + jX_0 l) = \frac{(P^2 + Q^2) \cdot (R_0 l + jX_0 l)}{\left( \frac{U_1}{2} + \sqrt{\left( \frac{U_1}{2} \right)^2 - l \cdot (PR_0 + QX_0)} \right)^2} \quad (5)$$

式中:  $P = \sum_i P_{Li}$ ;  $Q = \sum_i Q_{Li}$ ;  $P_w = \sum_i P_{wi}$ ;  $Q_w = \sum_i Q_{wi}$ 。

风电接入后, 忽略无功传输, 线损的表述可以

修正为

$$\Delta S' = \frac{\left( (P - P_w)^2 + (Q - Q_w)^2 \right) \cdot (R_0 l + jX_0 l)}{\left( \frac{U_1}{2} + \sqrt{\left( \frac{U_1}{2} \right)^2 - l \cdot \left( (P - P_w)R_0 + (Q - Q_w)X_0 \right)} \right)^2} \quad (6)$$

由于  $(P - P_w)^2 + (Q - Q_w)^2 < P^2 + Q^2$ , 故  $\Delta S' < \Delta S$ 。

## 3 示范工程及实际应用效果

### 3.1 示范工程概述

为了进一步验证方案的有效性, 我们选择吉林电网中的“长岭 174 风电场”作为示范工程来进行研究, 如图 7 所示。长岭 174 风电场位于长岭县后八十八乡长白公路 174 km 处, 66 kV 岭太线在该风电场内通过。



(a) 长岭地区风电场接入示意图



(b) 长岭地区风电场现场图

图 7 长岭风电场示范工程

Fig. 7 Diagram of Changling wind power demonstration project

长岭县风资源丰富, 已成为吉林省百万千瓦风电基地。该县电网结构比较薄弱, 负荷较小。岭太线为连接 220 kV 长岭变电站供电与 66 kV 太平川变

电站的输电线路。该线路长 64.703 km, 由于线路过长, 66 kV 压降过大, 致使末端电压过低, 无法正常运行。

### 3.2 应用效果

为验证该方案的可行性及对末端电压的提升效果。本文根据表 1 所示数据进行计算。

给出 2013 年 12 月 9 日, 负荷数据和风电出力数据如图 8 所示。图 8 中“负荷”曲线为 2013 年 12 月 9 日某 66 kV 变电站负荷曲线, “风电总出力”曲线为当天 11 台风电出力曲线。

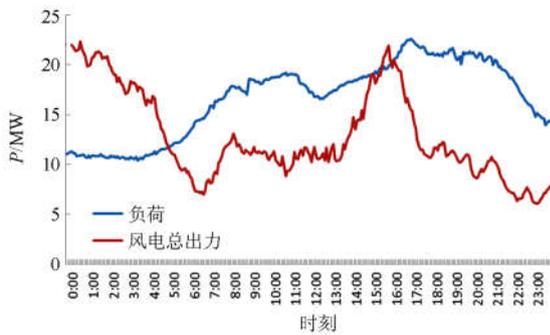


图 8 某农村 66 kV 变电站负荷出力和风电总出力

Fig. 8 Curves of the load and wind power in a 66 kV rural substation

图 9 给出了负荷侧电压在并入风电前后的曲线。图中曲线“ $U_{LW}$ ”与“ $U_L$ ”分别为有风电并网时和无风电并网时的负荷端电压曲线。由于前端电压都有提升, 因此负荷侧电压自然水涨船高, 得到提升, 从图 9 可以看出每个时间段都有最少 2% 的提升, 最高提升幅度达 5%, 效果相当明显。

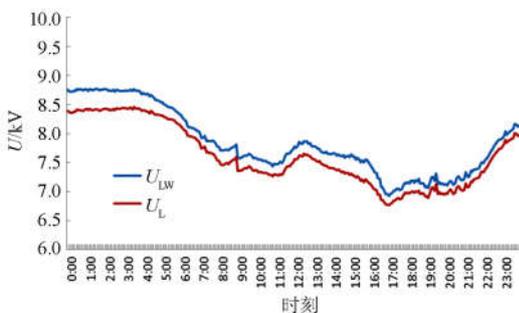


图 9 负荷侧电压在并入风电前后的曲线

Fig. 9 Curves of the load voltages before and after wind power integration

计算风电机组并网的馈线线损, 如图 10 所示。可见, 馈线末端并入风电机组后, 馈线线损大幅度下降。线损减少率最大 100%, 最小 21%, 平均有 75%。

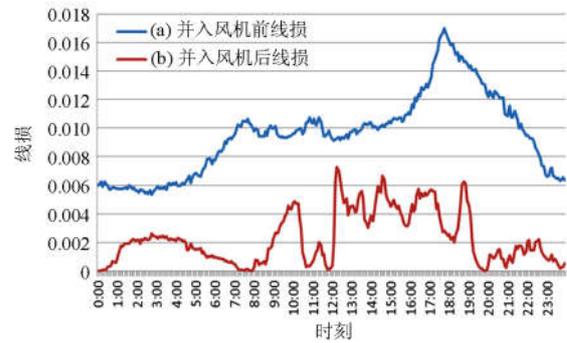


图 10 风电机组并网前后线损对比情况

Fig. 10 Power loss of the feed line before and after wind power integration

为了比较两种方案对负荷末端电压抬升的效果, 我们对电压抬升比例进行了计算, 得到如图 11 所示对比曲线。曲线结果和 2.2 节中原理分析完全吻合。

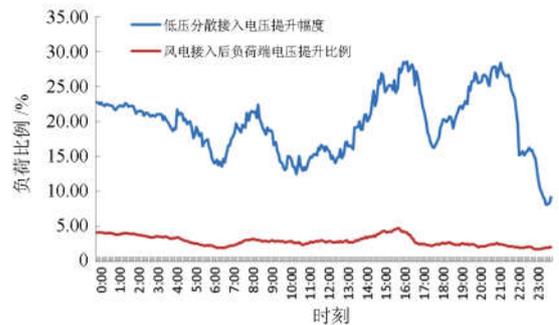


图 11 两种方案下电压提升比例对比曲线

Fig. 11 Curves of the voltage change rate between different wind power integration methods

长期来看, 风电调节电压的实际效果决定于风况。风况越好, 取得的效果就好。现场生产统计数据显示, 试验示范地点的年电压合格率, 由安装前的 96.99% 提高到 98.89%。

## 4 结语

1) 配电网线路末端电压低制约新型配电网建设的主要问题, 由于线路长, 供电半径大, 线路末端电压低, 严重影响了部分地区的正常生产生活用电。

2) 本文提出一种基于风电分散接入的提升配电网末端电压的实用技术, 其核心思想是将风机接入的位置选于 66 kV 线路中段, 经升压站升压到 66 kV 后并入到 66 kV 系统, 以此提升 10 kV 线路末端电压。分布式发电具有污染少、可靠性高、能源利用

效率高和安装地点灵活等多方面优点,可有效解决配电网线路末端电压低的问题。

3) 本文方法的实际效果决定于风况。风况越好,取得的效果就好;没有风时,由于失去了有功支撑,提升电压的效果必然会下降。

4) 通过选取吉林省某风电场进行试点,证实了风电分散接入的低压配电网方案具备实用化价值,该方案具有出力曲线平稳,电压波动小;运行控制方便,方便电容器投切、出力调整;建设运行维护成本低;扩容方便等优势。

5) 本文成果表明,在不增加建设成本的情况下,通过合理布局分布式电源的并网点,可以缓解农村供电能力不足和“低电压”问题;推广后能显著增加风电消纳能力,促进风电产业发展,并带来显而易见的节能减排效益。

#### 参考文献

- [1] 郭志国, 史晓明, 高兆平. 吉林省农村电网“低电压”分析与治理[J]. 吉林电力, 2011, 39(6): 43-45.  
GUO Zhiguo, SHI Xiaoming, GAO Zhaoping. Analysis and solution on low voltage problem in rural power grid of Jilin province[J]. Jilin Electric Power, 2011, 39(6): 43-45.
- [2] 朱勇, 杨京燕, 高领军, 等. 含异步风力发电机的配电网无功优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 80-85.  
ZHU Yong, YANG Jingyan, GAO Lingjun, et al. Research on optimal reactive power planning for distribution network containing asynchronous wind power generators[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 80-85.
- [3] 陈琳, 钟金, 倪以信, 等. 含分布式发电的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(14): 20-24.  
CHEN Lin, ZHONG Jin, NI Yixin, et al. Optimal reactive Power planning of radial distribution systems with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 20-24.
- [4] 颜伟, 吕冰, 赵霞, 等. 分布式风电源与配网联络线协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 1-6.  
YAN Wei, LÜ Bing, ZHAO Xia, et al. Coordinated allocation of DGs and tie lines in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 1-6.
- [5] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-134.  
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-134.
- [6] 刘健, 张小庆, 同向前, 等. 含分布式电源配电网的故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 36-42.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, TONG Xiangqian, et al. Fault location for distribution systems with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 36-42.
- [7] 王贵斌, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化, 2012, 37(19): 22-29.  
WANG Guibin, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 37(19): 22-29.
- [8] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 2-10.  
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, YANG Aimin, et al. Impacts of electric vehicles on power systems as well as the associated dispatching and control problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 2-10.
- [9] 冯希科, 邵能灵, 宋凯, 等. DG容量对配电网电流保护的影响及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 156-160.  
FENG Xike, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Research on the impact of DG capacity on the distribution network current protection and counter measure[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 156-160.
- [10] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.  
WANG Jianghai, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Penetration level permission off or DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [11] 吴宁, 许扬, 陆于平. 分布式发电条件下配电网故障区段定位新算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 77-82.  
WU Ning, XU Yang, LU Yuping. New fault section location algorithm for distribution network with DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 77-82.
- [12] BRAHMAS M. Fault location in power distribution

- system with penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1545-1553.
- [13] 殷树刚, 张宇, 拜克明, 等. 基于实时电价的智能用电系统[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 11-16.  
YIN Shugang, ZHANG Yu, BAI Keming, et al. A smart power utilization system based on real-time electricity prices[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 11-16.
- [14] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68.  
MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [15] 潘超, 焦薇羽, 孟涛, 等. 基于混合智能粒子群算法的广义电源主动配电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 69-75.  
PAN Chao, JIAO Weiyu, MENG Tao, et al. Optimal allocation of generalized power sources in active distribution network based on hybrid intelligent particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 69-75.
- [16] 巨云涛, 林毅, 王晶, 等. 考虑分布式电源详细模型的配电网多相状态估计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 147-152.  
JU Yuntao, LIN Yi, WANG Jing, et al. Multi-phase distribution state estimation considering detailed models of distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 147-152.
- [17] 汪隆君, 郭俊宏, 王钢, 等. 主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 136-146.  
WANG Longjun, GUO Junhong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming model for islanding partition of active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 136-146.
- [18] 曾博, 杨煦, 张建华. 考虑可再生能源跨区域消纳的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(22): 148-158.  
ZENG Bo, YANG Xu, ZHANG Jianhua. Multi-objective optimization for active distribution network scheduling considering renewable energy harvesting across regions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 148-158.
- [19] 雷涛, 吕勇, 马淑慧. 基于改进灰色理论的主动配电网中长期负荷预测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(9): 22-28.  
LEI Tao, LÜ Yong, MA Shuhui. Mid-long term load forecasting of active distribution network based on improved grey theory[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(9): 22-28.
- [20] 王正宇, 金尧, 蒋传文, 等. 考虑光伏储能和可控负荷的配电网检修计划优化[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 74-82.  
WANG Zhengyu, JIN Yao, JIANG Chuanwen, et al. Consideration of photovoltaic system with energy storage and controllable load[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 74-82.

---

收稿日期: 2016-11-14; 修回日期: 2017-05-12

作者简介:

王佳颖(1981—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为光学测量在电力系统中的应用, 智能电网技术, 直升机电力作业技术。E-mail: imwangjiaying@foxmail.com

(编辑 周金梅)