

# 考虑多安全性约束的风电场穿透功率极限研究

王深哲<sup>1</sup>, 高山<sup>2</sup>, 尤国伟<sup>1</sup>, 郭政<sup>1</sup>

(1. 国网南京供电公司, 江苏 南京 210009; 2. 东南大学, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 穿透功率极限是含风电场电网规划中的重要问题。本文从梳理风电场穿透功率的多种约束条件入手, 建立了包含系统潮流平衡、支路潮流、常规机组出力等约束条件的风电穿透功率极限计算模型, 在此基础上引入了风电波动导致的系统频率偏差及电压偏差等安全性约束条件。提出了基于系统惯性中心频率的频率偏差指标和基于系统线性化方法的电压偏差指标, 从安全性角度考虑了风电接入容量的影响因素。采用遗传算法对模型进行求解, 相关算例证明了该方法的准确性和合理性。

**关键词:** 穿透功率; 频率偏差; 节点电压偏差; 遗传算法

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)03-0057-06

## 0 引言

风电穿透功率极限是指系统在满足安全稳定运行的前提下能够接纳的最大风电容量<sup>[1]</sup>。目前风电作为一种商业化程度最高的可再生能源发展极为迅猛。截止到2015年, 我国风电装机容量已突破140 GW, 在风电装机持续增长的同时, 弃风现象也愈加严重, 尤其是在高风速资源富集的东北、内蒙、甘肃、新疆地区。分析弃风原因发现, 这类地区自身电源和电网结构较为薄弱, 本地消纳风电和平抑风电波动的能力较弱, 基本依靠远距离外送消纳风电电量。因此准确评估地区风电穿透功率极限, 由此制定合理的风电发展规划和外送通道建设规划对保持风电持续健康发展具有重要意义。

目前国内外学者已对风电穿透功率极限进行了一定的研究。文献[2]利用时域仿真法计算了保证暂态稳定情况下的风电接入容量极限, 属于一种试凑性求解方法。文献[3,4]将风电穿透功率极限问题转化为满足系统稳定运行约束条件的优化问题, 并考虑了风电出力的随机性。文献[5]利用时域仿真方法, 以频率和电压作为约束条件计算了风电穿透功率极限。文献[6,7]建立了风电接入下的动态频率稳定指标, 但对风电随机性考虑不足。

本文主要针对实时控制尺度下的风电场穿透功率极限进行研究。首先建立了考虑系统功率平衡、节点电压、系统备用容量和常规发电机出力约束的风电穿透功率极限随机规划模型。在此基础上进一步考虑系统频率和电压等动态安全性约束

条件, 建立了基于系统惯性中心频率的动态频率偏差指标和基于系统线性化模型的动态电压偏差指标, 采用基于Gramm-Charlier级数随机潮流的遗传算法对本文模型进行求解。

## 1 穿透功率极限计算模型

### 1.1 现有模型

目前常用的风电场穿透功率极限评估方法主要有时域仿真法、静态安全约束法、短路容量法、现代优化方法等。其中优化方法以考虑因素全面、全局寻优能力强等优势逐渐成为主流算法。

为考虑风电功率的随机性, 通常在穿透功率极限优化模型中引入随机规划方法。典型风电穿透功率极限随机规划模型可表示为:

$$\begin{aligned} & \max(e^T P_R) \\ & \sum_i P_{Ri} + \sum_j P_{gj} - \sum_k P_{dk} = 0 \\ & \Pr\{g(u, P_R, P_g, P_d) \leq P_{lmax}\} \geq \alpha \quad (1) \\ \text{s.t.} & \Pr\{c^T(P_{gmax} - P_g) \geq P_{sr}\} \geq \beta \\ & \Pr\{u_{min} \leq u \leq u_{max}\} \geq \gamma \\ & P_{gmin} \leq P_g \leq P_{gmax} \end{aligned}$$

式中:  $P_R$  为风电场装机容量;  $P_g$  为常规机组出力;  $P_{gmax}$  为常规机组出力上限;  $P_{gmin}$  为常规机组出力下限;  $P_{sr}$  为常规机组备用容量限值;  $P_d$  为负荷功率;  $P_{lmax}$  为支路功率限值;  $u$  为节点电压;  $u_{max}, u_{min}$  分别为节点电压上下限;  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为概率限值。

该模型以风电场接入容量最大为目标, 约束条件包含系统功率平衡、支路容量、备用容量限制和发电机出力约束等。

### 1.2 本文模型

现有模型大多采用静态约束条件, 实际风电场

收稿日期: 2016-12-23; 修回日期: 2017-02-04

基金项目: 国家高科技研究发展计划资助项目(863计划)(2011AA05A105)

在运行中出力处于实时波动状态,含风电接入系统处于实时的动态稳定状态。单纯的静态约束条件可能导致风电场穿透功率的计算结果过于乐观。

风电场的功率波动对接入系统的有功、无功平衡存在实时扰动,导致接入系统的频率和电压处于实时波动状态。为保证系统安全稳定,《可再生能源并网技术导则》对系统的频率和电压偏差情况均有明确的规定,因此风电场的出力特性也必须满足这一约束条件。为此本文建立了考虑系统频率和电压偏差等多安全性约束条件的风电穿透功率极限评估模型。

$$\begin{aligned} & \max(e^T P_R) \\ & \sum_i P_{wi} + \sum_j P_{gj} - \sum_k P_{dk} = 0 \\ & \Pr\{g(u, P_R, P_g, P_d) \leq P_{lmax}\} \geq \alpha \\ & \Pr\{c^T(P_{gmax} - P_g) \geq P_{sr}\} \geq \beta \\ \text{s.t.} & \Pr\{u_{min} \leq u \leq u_{max}\} \geq \gamma \\ & P_{gmin} \leq P_g \leq P_{gmax} \\ & f_{min} \leq F(P_R) \leq f_{max} \\ & Vol_i(P_R) \leq Vol_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $F(P_R)$  为风电穿透功率为  $P_R$  时的系统频率;  $f_{min}$ ,  $f_{max}$  分别为系统频率的上下限;  $Vol_i(P_R)$  为风电穿透功率为  $P_R$  时系统节点  $i$  的电压偏差;  $Vol_i$  为系统节点电压偏差的限值。

## 2 安全性约束条件

### 2.1 频率偏差约束

系统频率分为节点频率、发电机频率和整体频率等。随着现代电网规模的不断扩大,系统受到功率扰动后的频率过程具有明显的时空分布特性。频率作为系统的全局变量,在不发生频率崩溃的情况下,系统各局部的频率经过不同的暂态过程后最终按照统一的动态过程变化,即按照系统惯性中心频率的动态过程变化<sup>[8,9]</sup>,因此本文选用系统惯性中心频率来定义频率偏差约束指标。

惯性中心频率是根据系统等值模型来定义的。对于一定规模的系统,认为各发电机间联系紧密,网络影响可忽略,系统各机组频率响应状态相同。此时可采用系统等值的单机带集中负荷的模型来计算系统频率响应。

系统等值模型主要包括全状态模型、平均系统频率模型(ASF)模型和包含原动机-调速器等值环节的系统响应频率模型(SFR)模型<sup>[10,11]</sup>。全状态模型精度较高,但计算较为复杂。本文主要分析系统受到风电功率及负荷突变扰动后的频率响应,因

此在计算系统惯性中心频率的前提下,可将全网同步发电机转子运动方程等值聚合为单机模型,保留各机组原动机-调速系统独立响应,同时将原动机-调速器系统动态环节也进行动态等值拟合,得到本文选用的 SFR 模型,如图 1 所示。

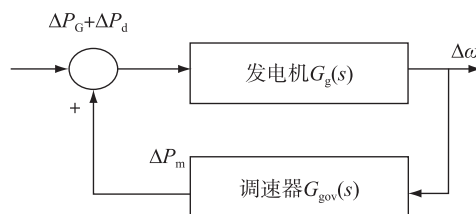


图 1 系统等值 SFR 模型

Fig.1 System equivalence SFR model

图中发电机与调速器传递函数为:

$$\begin{cases} G_g(s) = \frac{1}{2Hs + D} \\ G_{gov}(s) = \frac{K_m}{R} \frac{1 + F_H T_R s}{1 + T_R s} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $H$  为发电机惯性时间常数;  $D$  为发电机等效阻尼系数;  $R$  为调节器调差系数;  $T_R$  为原动机再热时间常数;  $F_H$  为原动机高压缸做功比例;  $K_m$  为与发电机功率因数和备用系数相关的系数,  $K_m = PF(1 - f_{sr})$ ,  $PF$  为功率因数,  $f_{sr}$  为备用系数。

可推导得出此时系统的频率偏差表达式为:

$$\Delta f = \left( \frac{R\omega_n^2}{DR + K_m} \right) \left[ \frac{(1 + T_R s) P_d}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \right] \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{DR + K_m}{2HRT_R} \\ \zeta = \left[ \frac{2HR + (DR + K_m F_H) T_R}{2(DR + K_m)} \right] \omega_n \end{cases} \quad (5)$$

根据《电力系统安全稳定导则》,我国电网的惯性中心频率偏差不得超过  $\pm 0.2$  Hz,以此作为系统频率偏差的约束条件。

### 2.2 电压偏差约束

目前对风电功率波动所导致的电压偏差基本采用经验公式进行计算,这类方法对于处理风电功率波动这样的连续随机性扰动情况精度不足。文献[12]推导了基于风电机组等值电路和系统线性化模型的电压波动计算方法,但采用的模型较为简单,没能完整地理论上解决这一问题且计算方法较为繁琐。借鉴该文思想,将风电功率波动看作系统的小扰动<sup>[13]</sup>,采用小干扰稳定理论研究风电功率波动给节点电压带来的影响<sup>[14-19]</sup>。

首先建立包含风力发电系统的全系统线性化

模型,同步发电机采用考虑励磁系统动态的三阶实用模型,负荷采用电压静特性模型,风力发电系统选用采用解耦控制策略的双馈风力发电系统。则此时的系统线性化模型<sup>[20]</sup>为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta x_g}{dt} = A\Delta x_g + B\Delta V_g + p\Delta P_{mw} \\ \Delta I_g = C\Delta x_g + D\Delta V_g \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{mw}$ 为风电机组机械功率变化量; $\Delta x_g$ 为状态变量变化量; $\Delta V_g$ 为节点电压变化量; $\Delta I_g$ 为节点注入电流变化量。

考虑网络影响,系统的网络方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_g \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\Delta V_g$ 为状态变量节点的电压偏差,此处风电场不再作为一个负的负荷,而是同样作为发电机节点处理; $\Delta V_l$ 为其余节点的电压偏差, $Y_{GG}$ 为状态变量节点自导纳矩阵; $Y_{GL}$ , $Y_{LG}$ 为状态变量节点与其他节点间的互导纳矩阵; $Y_{LL}$ 为除状态变量节点外其他节点的自导纳矩阵。

将系统网络方程与式(6)联立可得:

$$\Delta V_g = (Y_{GG} - Y_{GL}Y_{LL}^{-1}Y_{LG} - D)^{-1}C\Delta x_g \quad (8)$$

对系统线性化模型进行整理,得到全系统线性化模型为:

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A'\Delta x + p\Delta P_{mw} \quad (9)$$

可得:

$$\Delta x = (sI - A')^{-1}p\Delta P_{mw} \quad (10)$$

取  $s = j\omega$ , 有:

$$\Delta x = (j\omega I - A')^{-1}p\Delta P_{mw}(f) \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)可得风电场接入节点的电压偏差为:

$$\Delta V_g = (Y_{GG} - Y_{GL}Y_{LL}^{-1}Y_{LG} - D)^{-1} \cdot C(j\omega I - A')^{-1}p\Delta P_{mw}(f) \quad (12)$$

根据网络方程可得到其余节点的电压偏差为:

$$\Delta V_l = -Y_{LL}^{-1}Y_{LG}(Y_{GG} - Y_{GL}Y_{LL}^{-1}Y_{LG} - D)^{-1} \cdot C(j\omega I - A')^{-1}p\Delta P_{mw}(f) \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可得到在一定的风电功率波动情况下,系统各节点的电压波动情况。

本文所建立电压偏差指标可考虑网络状况对电压波动的约束,且可以考虑不同的风电机组类型和控制方式对风电功率波动的影响以及对电压波动状况的影响。

### 3 穿透功率模型求解

由于优化模型中引入了随机变量和机会约束,

需要采用相应的随机变量处理方法,本文采用基于Gram-Charlier级数的随机潮流方法处理随机变量,采用遗传算法求解穿透功率极限模型。

#### 3.1 随机潮流

随机潮流也称概率潮流,它是用随机变量给出节点的已知条件,来求解线路潮流参数的方法,传统的潮流算法是给定网络的拓扑结构、节点注入功率等,得出的结果也是确定的,但是电力系统的运行存在多种随机因素,风电场的大规模接入后,风电强烈的出力随机性会对系统产生巨大的扰动,因此需要采用随机潮流来揭示电力系统的运行特性。

本文采用以牛顿-拉夫逊潮流计算为基础的线性化模型,利用半不变量方法进行随机潮流变量间的卷积运算,并用Gram-Charlier级数展开式计算随机变量的分布。

#### 3.2 遗传算法

遗传算法是建立在自然选择原理和遗传机制上的迭代式自适应概率性搜索方法。目前这种方法已经广泛用于电源规划、输电网络规划等电力系统领域。优化问题中如果目标函数多峰或者搜索空间不规则,就要求算法具有较好的鲁棒性,以避免收敛到局部最优点。遗传算法的特点是全局搜索能力强。本文选用结合随机潮流和遗传算法的方法求解模型,算法流程如图2所示。

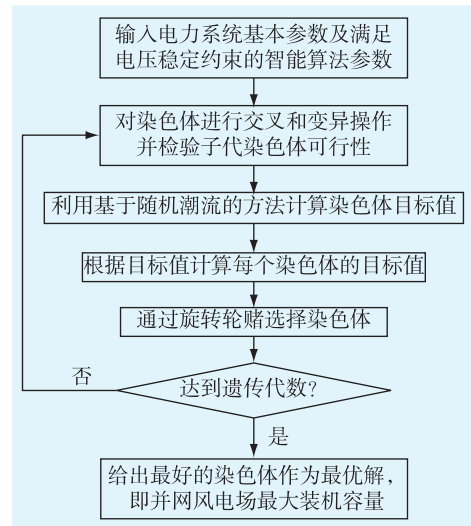


图2 遗传算法流程

Fig.2 Flow chart of genetic algorithm

### 4 算例分析

本文选取 New England 10 机 39 节点系统作为算例<sup>[20]</sup>,系统接线方式如图3所示。所有的功率以 100 MV·A 为基准,标么处理后参与计算,系统总负荷 6083 MW。

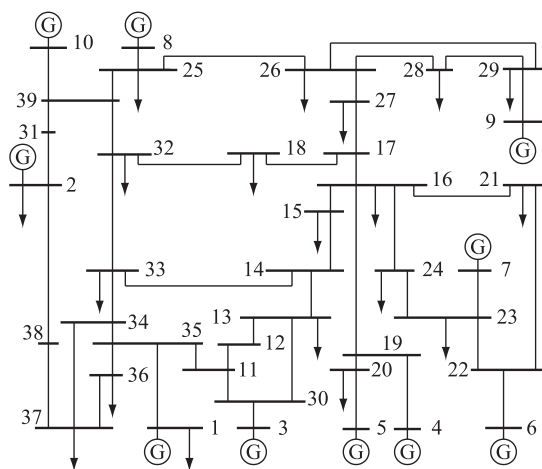


图3 NewEngland 10机39节点系统

Fig.3 NewEngland 10-generator 39-bus system

计算当风电场在不同接入位置、分散与集中接入以及考虑系统频率偏差和电压偏差指标前后系统风电穿透功率极限的变化情况。假设风场由额定功率为1.5 MW的双馈型风力发电机组组成,风电场采用并联加权法进行等值。

#### 4.1 不同接入点计算结果

为凸显接入点本身带负荷量以及网络结构的影响,分别选取重负荷节点、中间节点、网络末端节点和网络核心节点作为风电接入公共连接点(PCC),计算考虑本文提出安全性指标情况下,不同接入点时的风电场接入功率极限。

根据 New England 10机39节点系统情况,节点5在全部负荷节点中带负荷量最大,选取为重负荷节点,节点11注入电流为0,选为中间节点。以节点的并联支路数作为判别条件,选取节点13为末端节点,节点22为网络核心节点。分别计算风电场分别接入上述4个节点时的穿透功率极限,计算结果如表1所示。

表1 不同接入点时风电穿透功率极限

Table 1 Wind power penetration limitation in different PCC point MW

风电接入节点号	穿透功率极限
5	284.5
11	545.8
13	417.1
22	902.4

根据计算结果可知,风电场接入核心节点时穿透功率最大,风电场接入重负荷节点时接入容量最小。计算中选取的四类节点的穿透功率极限依次为:核心节点>中间节点>末端节点>重负荷节点。

#### 4.2 分散与集中接入计算结果

为对比分散与集中接入情况下风电场穿透功

率极限的变化,分别设定风电PCC点为13节点和13、22节点。根据前述分析,风电场接入网络核心节点更有利于消纳风电,为此选定的两组PCC均为系统网络核心节点。为增加计算结果的可比性,分别计算考虑安全性指标情况下风电场集中接入13、22节点以及分散接入13和22号节点时的风电穿透功率极限,计算结果如表2所示。

表2 不同接入方式风电穿透功率极限

Table 2 Wind power penetration limitation in different access mode MW

风电接入方式	接入容量极限
集中接入13	417.1
集中接入22	902.4
分散接入	1201.7

研究结果表明,风电场分散接入系统有利于提高接入容量极限。原因是分散接入情况下风电容量波动可在更大范围内消纳。集中接入下,系统的调节能力受到接入点相连线路传输容量等的限制,全网络的消纳能力不能充分利用。

同时发现,分散接入时的穿透功率极限小于集中接入两节点时的穿透功率极限之和。分散接入虽然能够实现更大范围内消纳,但接纳的上限仍受到系统整体功率平衡和接纳能力的限制。

#### 4.3 考虑安全性指标前后计算结果比较

为验证本文所提出安全性指标对风电场穿透功率极限评估的有效性,分别对考虑安全性指标前后的接入容量极限进行计算。设定风电场为单点接入和多点接入,分别计算两种接入方式下考虑安全性指标前后风电场穿透功率极限。

分别假设风电场集中接入13号节点或者分散接入13、22号节点,考虑安全性指标前后风电场穿透功率极限如表3所示。

表3 考虑安全性指标前后风电穿透功率极限

Table 3 Wind power penetration limitation considering security constraints before and after MW

风电接入方式	集中接入	分散接入
考虑前	612.5	1814.7
考虑后	417.1	1201.7

根据研究结果可知,考虑安全性指标后风电场接入容量极限出现了一定程度的下降。考虑安全性约束指标前系统仅从功率平衡角度考虑风电消纳问题,得到的计算结果过于乐观。在目前的电网形势下,大规模风电接入下的功率平衡较容易满足,但系统应对大规模风电波动性造成的频率波动和电压偏差等安全性问题的能力是制约风电消纳

的关键因素。因此考虑本文提出的安全性指标是必要且有效的。

## 5 结语

本文建立了一种考虑多种安全性约束条件的风电穿透功率计算模型。研究表明,单纯考虑静态约束指标会导致风电穿透功率极限计算结果过于乐观。风电出力具有随机性,其功率波动将会给系统频率和电压稳定带来显著影响,引入可表征系统安全性的惯性中心频率偏差指标和节点电压偏差指标能够更准确计算风电场的穿透功率极限。在模型中考虑集群风电场出力特性并计算各约束条件的灵敏度将是下一步的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 刘开俊. 风电并网对电网的影响分析及解决方案[J]. 中国电力, 2012, 45(9): 7-10.  
LIU Kaijun. Impacts and solutions of wind power integration on grids[J]. Electric Power, 2012, 45(9): 7-10.
- [2] 申洪, 梁军, 戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.  
SHEN Hong, LIANG Jun, DAI Huizhu. Calculation of wind farm penetration based on power system transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 8-11.
- [3] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 基于机会约束规划的风电穿透功率极限计算[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 32-35.  
LEI Yazhou, WANG Weisheng, YIN Yonghua, et al. Wind power penetration limit calculation based on chance constrained programming[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(5): 32-35.
- [4] 吴俊, 李国杰, 孙元章. 基于随机规划的并网风电场最大注入功率计算[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 15-19.  
WU Jun, LI Guojie, SUN Yuanzhang. Maximum injection power calculation of wind farms connected to power systems based on stochastic programming[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 15-19.
- [5] 张俊, 晁勤, 段晓田, 等. 动态约束下的风电场最大可接入容量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 62-73.  
ZHANG Jun, CHAO Qin, DUAN Xiaotian, et al. Research on maximum access capacity of wind farm based on dynamic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 62-73.
- [6] LIN Jin, SUN Yuanzhang, SORENSEN P, et al. Method for assessing grid frequency deviation due to wind power fluctuation based on "time-frequency transformation" [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 65-73.
- [7] LUO Changlin, FAR H G, et al. Estimation of wind penetration as limited by frequency deviation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 783-791.
- [8] 韩英铎, 王仲鸿, 闵勇, 等. 电力系统动态频率的定义及“虚拟转子法”频率测量研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1993, 33(1): 1-10.  
HAN Yingduo, WANG Zhonghong, MIN Yong, et al. The definition for dynamic frequency in power systems and the fictitious rotor method for dynamic frequency measurement[J]. Journal of Tsinghua University, 1993, 33(1): 1-10.
- [9] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.  
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [10] 秦旭东. 大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4): 6-12.  
QIN Xudong. Influence and strategy study of the frequency regulation of Jiangsu Power Grid with large-scale wind power integration[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(4): 6-12.
- [11] YOUSOF M F M, EKANAYAKE C, SATA-TAPAN K, et al. A study on suitability of different transformer winding models for frequency response analysis [C] // Power and Energy Society General Meeting, San Diego, USA, 2012.
- [12] ABDELKADER S M, FLYNN D. Graphical determination of network limits for wind power integration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(9): 841-849.
- [13] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 255-278.  
WANG Xifan. Modern power system analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003: 255-278.
- [14] SORENSEN P, CUTULULIS N A, VIGUERAS-RODRIGUEZ A, et al. Model of power fluctuations from large offshore wind farms[J]. Wind Energy, 2008, 11(1): 29-43.
- [15] 赵海翔. 风电引起的电压波动和闪变研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.  
ZHAO Haixiang. Studies on voltage fluctuation and flicker caused by integrated wind power [D]. Beijing: China Electric Power Research, 2004.
- [16] PRIDE J C, CARRILLO C J, LORENZO A E F. Probabilistic model for mechanical power fluctuations in asynchronous wind parks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 761-768.
- [17] 陈建华, 杜磊, 陈天华, 等. 多控制区多无功源协调的风电集群电压控制[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 47-51.  
CHEN Jianhua, DU Lei, CHEN Tianhua, et al. Voltage control for multi-controlled domain and multi-reactive power source coordinated wind power cluster [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 47-51.
- [18] 许晓艳, 马烁, 黄越辉, 等. 大规模风电接入对电网静态电压稳定性影响机理研究[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 139-143.  
XU Xiaoyan, MA Shuo, HUANG Yuehui, et al. Mechanical study on influence of large scale wind power on static voltage stability[J]. Electric Power, 2015, 48(3): 139-143.

(下转第 81 页)

## Analysis on Construction Scheme of Three Defense Lines for Independent Local Power Grid

XIA Yanhui, DONG Chen, SUN Dan, ZOU Yu

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd, Nanjing 211153, China)

**Abstract:** The structure characteristics of the independent local power grid are summarized firstly. Then, the security and stability problem of the local power grid is analyzed, combined with the development trend of the state promoting sales side reform. Three lines of defense construction scheme are proposed taking an independent local power grid as an example. Some key technical problems related to the stability control system, low frequency and low voltage load shedding, high frequency cutting machine, out-of-step splitting solution are discussed. The applicability of the scheme is verified by RTDS and off-line simulation, the feasibility of on-line and real-time stability control system is demonstrated. Finally, the construction principles of the three lines of defense for the independent local power grid are summarized.

**Key words:** independent local power grid; three lines of defense; stability control system; automatic safety device; online realtime stability control

(编辑 徐林菊)

(上接第 61 页)

- [19] 卫 鹏, 刘建坤, 周 前, 等. 基于半不变量和 Gram-Charlier 级数展开法的随机潮流算法[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 34-38.

WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. A probabilistic power flow algorithm based on semi-variable and Gram-Charlier series expansion [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 34-38.

- [20] 王深哲, 高 山, 李海峰, 等. 含风电接入的电网规划方案电能质量评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 56-65.

WANG Shenzhe, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Evaluation of power quality in grid planning scheme with power integration [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 56-65.

作者简介:



王深哲

王深哲(1987—),男,河南周口人,博士,从事电力系统规划及稳定分析工作;

高 山(1973—),男,山东济南人,博士,副教授,主要研究方向为电力系统规划与稳定分析;

尤国伟(1966—),男,江苏常州人,工程师,从事电力系统分析工作;

郭 政(1982—),男,江苏南京人,工程师,从事电力系统分析工作。

## Wind Penetration Limitation Research Considered Multiple Security Constraints

WANG Shenzhe<sup>1</sup>, GAO Shan<sup>2</sup>, YOU Guowei<sup>1</sup>, GUO Zheng<sup>1</sup>

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210009, China; 2. Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Wind penetration limitation has great impact on power grid planning containing wind farm. In this paper, a traditional wind penetration limitation calculation model was built firstly, in which the constraints such as power flow, node voltage, and margin capacity were considered. The security constraints including frequency deviation and voltage deviation were considered based on the model. Frequency deviation based on central frequency and voltage deviation based on linear system theory were proposed with influencing factors of wind power access capacity considered from the viewpoint of safety. The research model was solved by GA method and its validity was verified by calculation results of New England 39-bus system.

**Key words:** wind penetration; frequency deviation; voltage deviation; GA

(编辑 刘晓燕)