

# 动态约束下的风电场最大可接入容量研究

张俊, 晁勤, 段晓田, 袁铁江

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 基于 DIgSILENT/Power Factory 仿真平台建立了新疆某地区含风电场的电力系统仿真模型, 以电压和频率两个电气量作为动态约束条件, 通过对风电场的穿透功率极限的计算和仿真, 确定了该地区电网的风电场最大可接入容量。研究结果表明: 采用频率约束法计算和时域仿真分析相结合确定的风电场最大可接入容量, 能保证风电系统的稳定运行; 并且优化影响风电系统稳定运行的因素和不同约束条件, 对确定系统的风电场最大可接入容量和风电场的设计、运行和规划都有重要意义。  
**关键词:** 风电场; 异步发电机; 动态约束; 最大接入容量; 穿透功率极限; DIgSILENT

## Research on maximum access capacity of wind farm based on dynamic constraints

ZHANG Jun, CHAO Qin, DUAN Xiao-tian, YUAN Tie-jiang

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** In this paper, a simulation model of power system with wind farm in some area of Xinjiang is established based on the DIgSILENT/Power Factory simulation platform. The wind power penetration limit is calculated and simulated with voltage and frequency being considered as dynamic constraints, and then the maximum access capacity of wind power plant of Xinjiang is determined. Research results show that the maximum access capacity of wind farm that determined by the combination of the frequency restriction and the time simulation can ensure the stability of wind power system. Besides, the optimization of some factors and other security constraints play a significant role in determining the maximum access capacity of wind farm and its designing, operating and planning.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50667002).

**Key words:** wind farm; asynchronous generator; dynamic constraint; maximum access capacity; penetration power limit; DIgSILENT

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)03-0062-05

## 0 引言

风能是一种可以用来发电的可再生能源, 由于它用之不尽、取之不竭, 所以近十几年来, 风能发电已在世界许多国家得到迅速发展, 并且成为全世界增长最快的能源, 倍受人们的青睐。但风能具有高度的随机性和波动性, 它不像常规发电机组那样保持恒定的功率输出。而功率的波动将会影响电力系统的电压和频率等电气量, 从而使电力系统的稳定性变差, 给系统的安全、经济运行带来显著的影响<sup>[1]</sup>。所以, 从某种意义上来说, 风电场实际上是电力系统的一个很大的干扰源。

因此, 随着风电在电网中所占的比例逐渐增高, 为使可开发的风资源得到充分地利用, 确定风电场

最大可接入容量问题成为风电研究中重要课题。文献[2]通过仿真分析风电系统的电压、有功和无功潮流表明风电场接入的容量水平由系统的网架结构和负荷水平决定。文献[3]采用内点法对在静态约束条件下风电准入功率问题进行了仿真分析, 结果表明此法可求解系统中包含多个风电场的穿透功率极限。文献[4]利用电力系统仿真软件 PSASP 验证了计算风电接入容量的改进算法的有效性。文献[5]仿真分析了风电系统在多种情况下的暂态稳定性, 从而确定风电的接入容量。

本文基于 DIgSILENT/Power Factory 仿真平台, 以新疆某地区实际电网为例, 构建了风电系统数字仿真模型。针对由恒速风力发电机组构成的风电系统, 根据该地区的实际情况分别以频率和电压作为风电场最大允许接入容量的约束条件, 采用频率约束法计算和时域仿真分析相结合的方法, 以风电场极限穿透功率为指标比较分析了在不同电气量约束

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50667002); 新疆教育厅重点项目 (XJEDU2008I62); 新疆青年自然科学基金项目 (2009211B04)

下电力系统的风电场可接入功率水平及其影响因素。

## 1 风力发电机组动态数学模型

建立了基于异步发电机的恒速风电机组的动态仿真数学模型, 由风速、风力机、轴系、异步发电机及补偿电容装置等组成。其模型如图 1 所示。

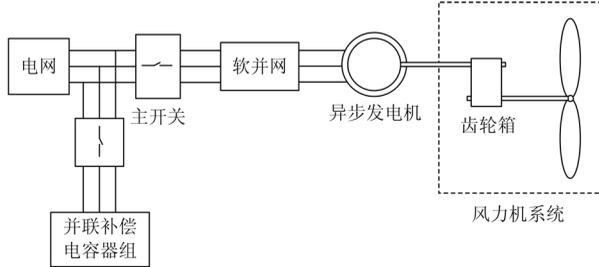


图 1 恒速风电机组模型结构示意图

Fig.1 Configuration diagram of fix-speed wind turbine

### 1.1 风力机系统部分数学模型

风轮叶片从风中获得的能量如式 (1) [6]:

$$P_w = \frac{\rho \pi r^2}{2} C_p(\lambda) V_w^3 \quad (1)$$

其中:  $P_w$  是从气流中获得的机械功率;  $\rho$  是空气密度;  $r$  是风机半径;  $C_p(\lambda)$  是风机的风能利用系数;  $\lambda$  是叶尖速率比, 即: 风轮叶尖速度  $v_t$  与风速  $v_w$  之比。 $C_p(\lambda)$  的近似曲线由式 (2) 给定 [7]:

$$C_p(\lambda) = 0.44 \left( \frac{125}{\lambda_i} - 6.94 \right) e^{\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{1/\lambda + 0.002} \quad (3)$$

由于风力机的机械传动部分具有非刚性、柔性连接等特点, 仿真中采用 2 阶模型。轮毂连接于叶片与齿轮箱之间, 近似用一阶惯性环节描述:

$$\frac{dM_t}{dt} = \frac{1}{T_1} (M_w - M_t) \quad (4)$$

其中:  $M_w$  是叶片侧机械转矩;  $M_t$  是齿轮箱侧机械转矩;  $T_1$  为轮毂的惯性时间常数。

当忽略轴承的阻尼后, 齿轮箱联轴器的动态方程如式 (5):

$$\frac{d\omega_w}{dt} = \frac{1}{T_2} (M_t - M_m) \quad (5)$$

其中:  $\omega_w$  为风力机机械角速度;  $M_m$  为联轴器发电机转子侧机械转矩;  $T_2$  为齿轮箱惯性时间常数。

### 1.2 异步发电机部分数学模型

风力发电机采用异步发电机, 建模过程中作了

如下假设: (1) 忽略磁饱和; (2) 磁场是正弦分布的; (3) 除铜耗外忽略所有的损耗; (4) 定子电流之和为零 [7]。

异步发电机同步坐标系下的定子电压方程和电磁功率方程如式 (6) 所示 [8-9]。

$$\begin{cases} U_{ds} = R_s I_{ds} - X'_s I_{qs} + E'_d \\ U_{qs} = R_s I_{qs} - X'_s I_{ds} + E'_q \\ P_{em} = 1.5 \omega_s p L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $U_{ds}$  和  $U_{qs}$  是同步坐标系下的定子电压;  $R_s$  是转子阻抗;  $X'_s$  是发电机暂态电抗;  $I_{ds}$ ,  $I_{qs}$ ,  $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$  分别是同步坐标下的定转子电流;  $E'_d$  和  $E'_q$  是发电机的暂态电势;  $P_{em}$  是发电机电磁转矩;  $\omega_s$  是参考坐标系旋转角速度;  $p$  是发电机的极对数;  $L_m$  是电感。

在进行动态仿真时, 风力发电机组的机械系统与电气系统的联系通过发电机的转子运动方程来描述:

$$T_J \frac{d\omega_r}{dt} = (M_m - M_e) \quad (7)$$

其中:  $\omega_r$  是发电机的转子角速度;  $T_J$  是发电机转子的惯性时间常数;  $M_m$  是发电机的输入机械转矩, 由式 (5) 计算得到;  $M_e$  是发电机输出的电磁转矩。

恒速风电机组在运行时发出有功功率的同时需要吸收电网的无功功率, 因此恒速风电机组需安装并联补偿电容器组, 以补偿其消耗的无功功率。

## 2 电网说明

本文是以新疆某地区的电网结构为例, 如图 2 所示。规划建设风电场 (母线 20) 在电网的末端接

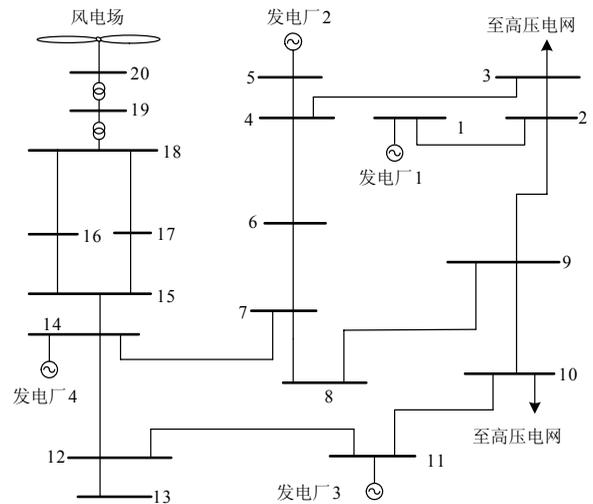


图 2 电网结构示意图

Fig.2 Configuration diagram of power grid

入，通过升压后在 PCC 点（母线 18）接入电力系统。系统中以 110 kV 电压等级为主网结构，通过中枢点母线 3 和母线 10 接入高压电网。

本例中考虑的风电场由恒速风电机组成。风机的出口电压是 690 V，采用 10 kV 的箱式变压器升压后输送到风电场自备的变电站升至 110 kV 接入 PCC 点，再通过两条线路分别接入变电站 16 和变电站 17。电网通过母线 3 和母线 10 接入 220 kV 高压电网，本地区最大负荷为 1 812.95 MW。

### 3 风电场穿透功率极限计算

国内外的众多研究人员主要用风电穿透功率极限这个指标来衡量风力发电接入电力系统的最大容量。风电穿透功率极限是指电力系统所能接入的风电场最大装机容量占系统最大负荷的百分比，即：风电穿透功率极限 =

$$\frac{\text{接入系统的风电最大装机容量}}{\text{系统最大负荷}} \times 100\% \quad (8)$$

风电场穿透功率极限是用来考虑风电场对电力系统稳定的影响，它从全网出发，确定系统可接入的风电场规模大小。在欧洲的一些国家风电穿透功率可达到 10%，而国内的风电比例还远远达不到这一指标。分析风电场最大接入容量的方法主要有时域仿真法，频率约束法，稳态潮流仿真法和静态安全约束和优化等方法。各种方法考察重点不同，适用的范围也不同<sup>[10-11]</sup>。

本文采用文献[12]所提出的方法在频率约束下计算风电场穿透功率极限，从而确定该地区电网的风电场最大可接入容量。本文省略了公式的具体推导过程，频率约束下的风电场接入容量计算如式(9)：

$$\frac{P_w}{P_L} \leq \frac{B}{A} + \frac{(1-B)C}{A} \times \frac{\Delta f}{f_n} \quad (9)$$

式中： $P_w$  为风电场装机容量； $P_L$  为最大负荷容量； $A$  为风机的负载率， $A=1$  时为风电接入容量最佳比例， $A=0.5$  时为风电场接入容量最大比例； $B$  为旋转备用容量比； $C$  为负荷频率调节效应系数； $\Delta f$  为允许频率偏差值； $f_n$  为初始电网频率。

上述的频率约束法，其基本原则就是当风电场由于停风或者过风而切机后所造成功率缺额最大值的条件：系统中常规机组的旋转备用经过频率调整之后，电网频率变化幅度不应大于频率允许偏差范围。根据国家标准（GB/T15945-95）《电力系统频率允许偏差》的规定，电力系统的正常频率允许偏差为  $\pm 0.2$  Hz，但是一些发达国家规定的频率偏差允许值不大于  $\pm 0.1$  Hz<sup>[13]</sup>。

根据该地区电网的实际情况，取  $P_L=1\ 812.95$  MW， $f_n=50$  Hz， $C=1.5$ ， $B=0.06$ ，对频率允许偏差为  $\pm 0.2$  Hz 时的风电场最大可接入容量进行了计算，结果如表 1。

表 1 风电场接入容量计算结果

Tab.1 Calculation results of wind power access capacity

A=1	119 MW
A=0.5	238 MW

### 4 动态约束仿真分析

#### 4.1 电压约束仿真

风电场接入电网以后，如果系统发生短路故障等大扰动时，风电系统易于失去电压稳定等故障，从而降低了系统的稳定性。所以需要对风电系统的暂态行为进行时域仿真分析，研究其暂态稳定性，从而确定系统的最大风电可接入容量。

电压约束仿真采用的分析原则是在系统发生大扰动时，系统中发电机的功角变化不超过  $180^\circ$  并且各节点的电压下降持续（一般为 1s）低于限定值（一般为 0.75 pu），就认为负荷电压或系统不稳定<sup>[14]</sup>。

仿真风电场出力的不同，考察其对电力系统暂态稳定性的影响程度，从而确定风电场的最大接入容量。仿真过程中考虑了该地区电网的最小运行方式，且系统的运行方式不发生变化，即忽略了变压器有载调压的作用、系统的并联电容器组的作用和负荷的电压静特性；负荷采用恒功率模型。在风电场接入系统 PCC 点出口（母线 18）一条线路 2 s 时发生三相短路故障，并在 0.15 s 后切除故障线路，仿真结果表 2、图 3~图 5（图中箭头所指的方向是风电场穿透功率增加的方向）。

表 2 不同风电接入容量故障时系统的稳定情况

Tab.2 Power system stability in fault with the change of wind power access capacity

风电接入容量/MW	系统稳定情况
102.25	稳定
163.6	稳定
184.5	稳定
194.28	不稳定
214.73	不稳定

上述仿真结果表明：在风电系统发生短路故障后，其电压的暂态稳定性与风电场的接入容量有密切的关系。分析图 3 和图 4，在电网故障之后，风电机组向故障点提供短时的无功功率，但在故障恢复过程中，风电机组重新建立电磁场需要从系统吸

收更多的无功功率,然而这样又会使电压降得更低,使电压恢复更加困难。如果风电场的接入容量较大时,系统就会失去稳定性。由图3中可以看出电压失稳后持续振荡在0.75 pu以下。与此同时,风电机组机端电压的迅速下降,抑制了风电场向电网注入有功功率,但是风机还在提供机械功率,由于异步发电机输入的机械功率和输出的电磁功率之间的不平衡,从而导致了异步发电机加速,如果系统中接入大量风电机组时,就同样会造成系统失去稳定性。风电系统的无功功率发生变化影响到系统中各发电机励磁跟随变化,致使各个发电机之间的功角关系发生变化,图5可以说明发电厂3的功角失稳。

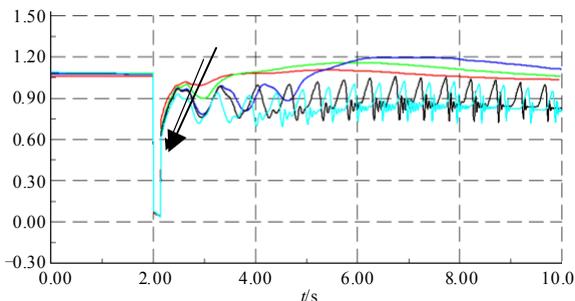


图3 PCC 母线电压变化曲线  
Fig.3 Voltage change curve of PCC

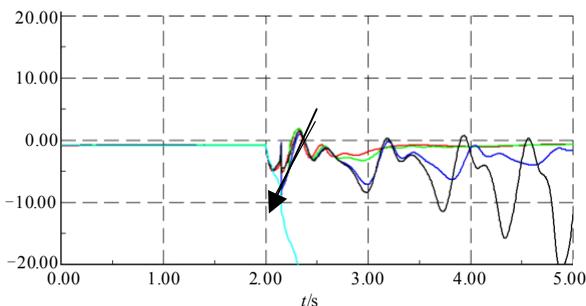


图4 恒速风电机组滑差变化曲线  
Fig.4 Slip change curve of fix-speed wind turbine

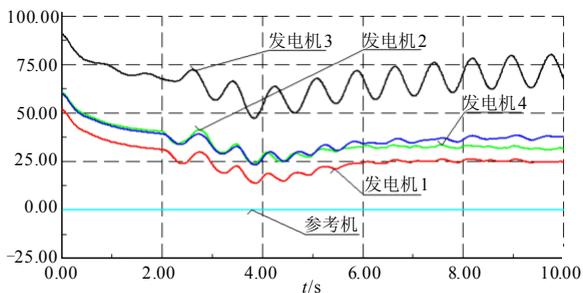


图5 常规发电机组功角变化曲线  
Fig.5 Angle change curve of generator

通过上述仿真,在电压约束条件下风电场的可接入容量不超过184.5 MW,则得到本地区风电场

的穿透功率极限为10.18%。

## 4.2 频率约束仿真

下面以稳态频率作为约束条件对上述风电系统进行了动态仿真,仿真过程中考虑风功率波动为最严重的情况,即风电场由于风速变化机组出力从额定值变化为零而造成系统的有功功率缺额,仿真时间30 s,但为了便于比较只绘制了前10 s的频率变化曲线。仿真结果如图6(图中箭头所指的方向是风电场穿透功率增加的方向)。

(1)按最佳接入容量仿真,即 $A=1$

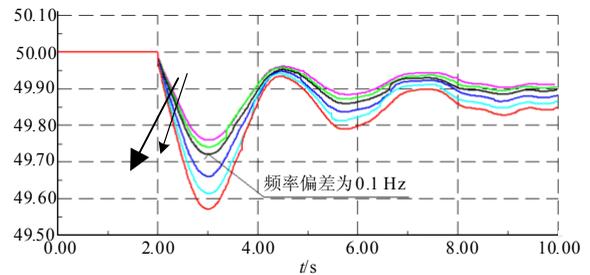


图6 不同接入容量下的频率偏差曲线1  
Fig.6 Frequency change curve 1 with the change of wind power access capacity

从图6中可以看出:当风电场接入容量为122.7 MW时,系统的稳态频率偏差为0.1 Hz,即当风电场按最佳比例接入系统时(119 MW),其对系统的频率影响较小,频率偏差不到0.1 Hz,满足国家标准中规定的频率偏差允许要求。

(2)按最大接入容量仿真,即 $A=0.5$ (如图7)

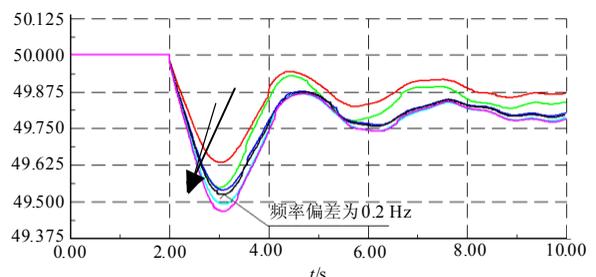


图7 不同接入容量下的频率偏差曲线2  
Fig.7 Frequency change curve 2 with the change of wind power access capacity

从图7中可以看出:当系统接入风电场容量大于202.46 MW时,系统频率偏差已经超出了国家标准中规定的 $\pm 0.2$  Hz的要求,即按照风电场最大接入容量计算的结果仿真(238 MW),系统已经失去稳定。

本节的仿真结果表明,在电网的其他约束条件满足时,随着风电接入容量逐渐增加,风电场对系统频率的影响越来越大。理论计算的风电场接入容

量与实际仿真结果虽然不同,但是相差不是很大,所以在实际情况下应综合考虑,以使风电场接入系统后减小对系统频率的影响<sup>[15]</sup>。通过上述分析可得,该地区的风电场接入容量小于 200 MW 时,可以满足稳态系统频率的稳定性,则该地区电网风电场的穿透功率极限为 11.03%。

## 5 结论

本文基于 DIgSILENT/Power Factory 仿真平台,构建了新疆某地区实际风电系统仿真模型,在动态约束下通过对风电场穿透功率极限的计算和仿真,结果分析表明:

1) 该地区的风电最大可接入容量不超过 185 MW,即该地区电网的风电场穿透功率极限为 10% 左右。

2) 综合以上分析结果,频率约束法计算的风电场穿透功率极限是从风电接入对系统频率影响的角度来分析的,忽略了其他电气量的约束,若只按照计算的结果接入风电,在系统发生故障时就会使系统失去稳定性。动态约束的时域仿真考虑的因素较多,得到的结果更接近实际情况。采用频率约束法计算和时域仿真分析相结合的方法分析确定的风电场最大可接入容量,可以使系统在风电接入后安全稳定地运行。

3) 本文在一个特定的运行方式下,针对由恒速风力发电机组构成的风电系统,采用不同的方法分析了系统的风电场穿透功率极限,从而确定了风电场最大可接入容量;而针对其他类型的风力发电机组接入系统,或者是风电接入系统的方案不同时该地区的风电场最大可接入容量可能会有变化,还有待于进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 王承煦,张源. 风力发电[M]. 北京:中国电力出版社,2003.  
WANG Cheng-xu, ZHANG Yuan. Wind power[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [2] Papadopoulos M, et al. Simulation and analysis of small and medium size power systems containing wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1991, 6 (4): 1453-1458.
- [3] 雷亚洲,王伟胜,印永华,等. 一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (6): 25-28.  
LEI Ya-zhou, WANG Wei-sheng, YIN Yong-hua, et al. An optimization method for determining wind power penetration limit in power system under static security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (6): 25-28.
- [4] 郑国强,鲍海,陈树勇. 基于近似线性规划的风电场穿透功率极限优化的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 68-71.  
ZHENG Guo-qiang, BAO Hai, CHEN Shu-yong. Amending algorithm for wind farm penetration optimization based on approximate linear programming method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 68-71.
- [5] 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 Hui-zhu. Calculation of wind farm penetration based on power system transient stability analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26 (8): 8-11.
- [6] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·依不拉音,等. 关于风电场适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (5): 47-51.  
WEN Yu-ling, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin, et al. Study on adaptive protection of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (5): 47-51.
- [7] 田春笋,李琼林,宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (19): 46-51.  
TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (19): 46-51.
- [8] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31 (9): 77-81.  
CHI Yong-ning, LIU Yan-hua, WANG Wei-sheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31 (9): 77-81.
- [9] 伍济开,江辉,彭建春. 基于同伦函数的风电系统频率稳定特征值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (31): 103-107.  
WU Ji-kai, JIANG Hui, PENG Jian-chun. Eigenvalue analysis on homotopy function based frequency stability of wind power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (31): 103-107.
- [10] 吴俊玲,周双喜,孙建锋,等. 并网风力发电场的最大注入功率分析[J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 28-32.  
WU Jun-ling, ZHOU Shuang-xi, SUN Jian-feng, et al. Analysis on maximum power injection of wind farm connected to power system[J]. Power System Technology, 2004, 28 (1): 28-32.
- [11] 廖萍,李兴源. 风电场穿透功率极限计算方法综述[J]. 电网技术, 2008, 32 (10): 50-53.  
LIAO Ping, LI Xing-yuan. A survey on calculation methods of wind power penetration limit[J]. Power System Technology, 2008, 32 (10): 50-53.

(下转第 73 页 continued on page 73)

- method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (11):1-5.
- [6] Tey L H, So P L, Chu Y C. Unified power quality conditioner for improving power quality using ANN with hysteresis control[C]. //International Conference on Power System Technology. 2004(2): 1441-1446.
- [7] 张志超, 魏富建, 王义峰. 单周期控制策略在统一电能质量调节器中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (22): 28-33.  
ZHANG Zhi-chao, WEI Fu-jian, WANG Yi-feng. Applied research on one-cycle control method of unified power quality conditioner[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (22):28-33.
- [8] 张辉, 刘进军, 黄新明, 等. 通用电能质量控制器直流侧电压控制建模与分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 144-149.  
ZHANG Hui, LIU Jin-jun, HUANG Xin-ming, et al. Modeling and analysis of DC link voltage control for universal power quality controllers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 144-149.
- [9] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.  
ZHOU Hui, QI Zhi-ping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29.
- [10] Etxeberria-Otadui I, Viscarret U, Bacha S, et al. Evaluation of different strategies for series voltage sag compensation[C]. //IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2002, 4: 1797-1802.
- [11] 袁川, 杨洪耕. 动态电压恢复器的改进最小能量控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 49-53.  
YUAN Chuan, YANG Hong-geng. Advanced minimum-energy control of dynamic voltage restorer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 49-53.
- [12] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69.  
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Lian-guang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase angle jump[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 64-69.
- [13] 尹忠东, 陈安源. 动态电压调节器串联注入变压器的一种设计方法[J]. 变压器, 2005, 42(9): 14-19.  
YIN Zhong-dong, CHEN An-yuan. A design method of dynamic voltage restorer with series connection of injection transformer[J]. Transformer, 2005, 42(9):14-19.
- [14] 尹忠东, 张卫华, 韩民晓. 动态电压恢复器注入变压器过饱和抑制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(24): 28-31.  
YIN Zhong-dong, ZHANG Wei-hua, HAN Min-xiao. Over-saturation suppression to dynamic voltage restorer injection transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(24): 28-31.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GBT 10228-2008 干式电力变压器技术参数和要求[S]. 2008.  
SAC Standardization Administration of China. GBT 10228-2008 specification and technical requirements for dry-type power transformers[S]. 2008.

收稿日期: 2010-02-11; 修回日期: 2010-04-20

作者简介:

沈虹 (1978-), 女, 讲师, 主要研究方向为电能质量补偿与智能控制; E-mail: shenhong@ysu.edu.cn

万健如 (1950-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电梯技术, 计算机控制。

(上接第 66 页 continued from page 66)

- [12] 宋联庆, 张锋, 晁勤, 等. 并网风电场穿透功率极限确定方法探讨[J]. 可再生能源, 2009, 27 (3): 36-39.  
SONG Lian-qing, ZHANG Feng, CHAO Qin, et al. Discussion on the penetration limit of the wind farm in grid[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27 (3): 36-39.
- [13] SAAD-SAOUD Z, JENKINS N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14 (3): 743-748.
- [14] CASTRO R M G, FERREIRA DE, JESUS J M. A wind park reduced-order model using singular perturbations theory[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11 (41): 735-741.
- [15] 李强, 张洋, 宋晓凯. 风电场接入电力系统容量的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (16): 20-24.  
LI Qiang, ZHANG Yang, SONG Xiao-kai. Researches on the capacity of wind power integration into power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (16): 20-24.

收稿日期: 2010-02-22; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

张俊 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: f2f\_tele@sina.com

晁勤 (1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究和教学;

段晓田 (1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气系统优化与设计。