

# 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析

田春笋, 李琼林, 宋晓凯

(河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 风力发电具有随机性和间歇性等特点, 大量风电的接入对电网的稳定运行带来了不可忽视的影响。详细分析了风电场各个环节的数学模型, 包括风力涡轮机、传动系统和风力发电机三个部分; 基于 PSASP 的用户程序接口 (UPI), 采用 VC 编写了用于风电场潮流和稳定计算的用户程序; 结合河南方城风电场的实际情况, 研究了风电场无功补偿容量的确定以及出口功率因数与转子滑差的关系; 仿真分析了风力发电机组并网时对电网产生的冲击影响, 并对风电场接入电网后的稳定性进行分析。仿真结果验证了所采用模型的正确性和实用性。

**关键词:** 风力发电; 风电场建模; 用户程序; 稳定性分析

## Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms

TIAN Chun-zheng, LI Qiong-lin, SONG Xiao-kai

(Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** Because of the randomness and intermittence, the integration of large-scale wind farm brings serious influence to the stability of power system. The model of the wind power system is analyzed in this paper which includes wind turbine, shaft system and wind generator. With the User Program Interface (UPI) of PSASP and Visual C++, the user programs of load flow and transient stability calculation are built. Based on the above model, user program and actual wind farm of Fangcheng Henan province, the relation of the reactive power and the rotor speed-slip is studied. The impactive current of the wind farm penetrating into the power network is calculated. The steady-state and transient-state influence of wind farm on power system are analyzed deeply. The outcome of the simulation proves the validity and practicality of the model.

**Key words:** wind power; modeling of wind farm; user program; stability analysis

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0046-06

## 0 引言

近年来, 风力发电凭借绿色环保、资源丰富、技术日趋成熟和应用成本不断降低等优势, 得到了世界各国的重视, 成为非化石燃料发电的重要来源。世界风电市场发展迅猛, 总装机容量从 1998 年的 10.2 GW 飞速发展到 2007 年底的 94.123 GW, 年平均增长率大于 28%, 特别是丹麦、西班牙等欧洲国家, 风力发电可以提供高达 10% 电力需求。而我国目前的能源结构很不合理, 新能源所占比重不足 1%, 风电占有量则更小<sup>[1]</sup>, 这与世界能源发展方向是不相符的, 因此应加快中国风电开发利用的力度, 必将大大缓解电力和电煤供求紧张的局面。中国风能资源丰富, 可开发利用潜力巨大, 截至 2007 年底, 中国风电装机容量达 6.053 GW, 位居亚洲第二, 全球第五<sup>[2]</sup>。

风电的运行特性不同于常规电源, 其输出的功

率取决于风速的大小, 具有随机性、波动性和不可控性, 且单机容量小, 往往是大量风力发电机组并列运行, 大量风电场的接入对电网的稳定运行带来了一定的影响<sup>[3-5]</sup>。变速型风力发电机组具有较高的运行效率, 且可以调节发电机输出功率因数, 在风电场中得到广泛应用, 但其出力仍然是间歇、波动和不可控的。文献[6]对双馈风力发电机组的动态模型展开了相应的研究, 文献[7]对永磁同步风力发电机的动态模型及其控制策略展开了相应的研究。异步感应风力发电机凭借造价低、控制简单, 也得到了广泛的开发利用, 但该机组运行时需要从电网中吸收无功功率进行励磁, 对电网的功率因数和电压水平造成一定的影响, 文献[8,9]对异步风力发电机组的模型进行了研究, 前者建立了异步风力发电机组的简化 RX 模型并进行了潮流计算分析, 但对风机和传动系统的模型没有进行论述。后者将传动系

统作为一种刚性模型进行考虑。

本文以异步风力发电机作为主要研究对象, 建立了风电场各环节的动态模型, 对风电场接入电网的影响进行分析, 并结合河南方城风电场, 利用 PSASP 对该电厂风电机组的无功补偿容量的确定、并网冲击电流及不同电压相角差对冲击电流的影响进行论证, 并对接入电网的稳定性也进行仿真计算, 从而为实际电厂的并网运行提供参考, 本文的风电场建模等研究方法也可以直接延拓到其它变速型风力发电机组的研究分析。

### 1 风电场模型

要研究风电场接入电网后的运行特性及其对电网的影响, 首先应建立正确、合适的风电场模型。风电场是一个涉及多学科的复杂系统, 主要由风力涡轮机、传动系统和发电机三个部分构成, 其中风力涡轮机是风力机捕获风能的装置, 应基于空气动力学知识建立它的模型; 传动系统是风力涡轮机和发电机之间的连接装置, 应基于机械理论和结构学知识建立传动系统的模型; 发电机是将机械能转换成电能的装置, 是风力机的核心部件, 应基于电磁场理论和电路知识建立发电机的模型。

#### 1.1 风力涡轮机模型

风力涡轮机从来风中捕获的风能  $P_M$  可表示如

式(1):

$$P_M = \begin{cases} 0 & V < V_{in} \\ 0.5\rho\pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) & V_{in} < V < V_n \\ P_N & V_n < V < V_{out} \\ 0 & V_{out} < V \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $V$  表示风速/ $m \cdot s^{-1}$ ;  $V_{in}$ 、 $V_n$ 、 $V_{out}$  分别表示切入风速、额定风速和切出风速;  $\rho$  表示空气密度/ $kg \cdot m^{-3}$ ;  $R$  表示风力涡轮机叶桨半径/ $m$ ;  $C_p$  表示功率系数;  $\lambda$  表示叶尖速比,  $\lambda = \frac{\omega_M R}{V}$ ;  $\beta$  表示叶桨螺旋角/ $rad \cdot s^{-1}$ ;  $\omega_M$  表示风力涡轮机转子角速度; 风力涡轮机的机械转矩  $T_M$  如式(2)所示:

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_M / p_i} \quad (2)$$

其中:  $\omega_M$  为转子角速度,  $p_i$  为发电机极对数。

功率系数  $C_p$  是表征风力涡轮机的重要参数, 表明了风力涡轮机从风中获得风能的效率, 是一个关于  $\lambda$ 、 $\beta$  的非线性函数, 根据 Betz 理论<sup>[10,11]</sup>,

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.593。$$

通常, 风机生产厂商提供的功率系数曲线都非常相似, 所以没有必要针对不同的风机采用不同的功率系数表达式。本文采用 Heier 方程来近似表达功率系数<sup>[12]</sup>:

$$C_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) \exp\left(\frac{-c_7}{\lambda_i}\right) \quad (3)$$

$$\text{其中: } \lambda_i = \left[ \left( \frac{1}{\lambda + c_8 \beta} \right) - \left( \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \right) \right]^{-1}$$

通过设置  $c_1$  到  $c_9$  的值, 可以得到与实际风机功率曲线较相近的曲线。

#### 1.2 传动系统模型

传动系统是连接风力涡轮机和发电机的重要装置, 主要由低速传动轴、齿轮箱和高速传动轴组成, 其结构示意图如图 1 所示:

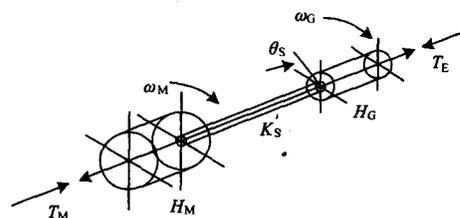


图 1 传动系统结构示意图<sup>[13]</sup>

Fig.1 Structure diagram of the shaft system<sup>[13]</sup>

风力发电机组的传动轴虽然长度不及汽轮发电机, 但其轴刚性系数远小于后者, 且大多风力机装有齿轮箱, 所以传动轴有很大的柔性, 在机组的动态过程中有可能产生扭转振荡。风力发电机传动系统的数学模型一般采用等效质量块法<sup>[6,13]</sup>。本文将传动系统等效为两个质量块 (Two-mass model): 风力涡轮机和低速轴为一个质量块、发电机转子和高速轴为另一个质量块, 该模型又称传动系统的柔性模型。通过整理传动系统的扭振方程可得到其状态方程如式(4)所示:

$$\begin{cases} H_M \frac{d\omega_M}{dt} = T_M - K_s \theta_s - D_M \omega_M \\ H_G \frac{d\omega_s}{dt} = K_s \theta_s - T_E - D_G \omega_s \\ \frac{d\theta_s}{dt} = a_0 (\omega_M - \omega_s) \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $H_M$ 、 $H_G$  分别为风力涡轮机、发电机时间常数;  $K_s$  为传动轴刚性系数,  $\theta_s$  表示传动轴扭转角度;  $D_M$ 、 $D_G$  分别为风国涡轮机、发电机的阻尼系数;  $\omega_s$  表示风力发电机的转子角速度;  $T_E$  表示风力发电机的电磁转矩。

#### 1.3 风力发电机模型

在描述异步风力发电机的模型时,需做以下假设:忽略饱和、磁滞和涡流,并假设磁通波正弦分布。规定转子电流的正方向为流入绕组方向,定子电流的正方向为流出绕组方向。由于转子绕组短路,所以转子电压为 0,如果忽略定子暂态电流中的直流分量,只表示基频分量,则可以得到风力发电机的状态方程如下:

$$\begin{cases} pV_D' = -\frac{1}{T_0}[V_D' - (X_S - X')I_{Qs}] + s\omega_s V_Q' \\ pV_Q' = -\frac{1}{T_0}[V_Q' + (X_S - X')I_{Ds}] - s\omega_s V_D' \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $V_D'$ 、 $V_Q'$  表示暂态电动势,  $X'$  表示暂态电抗,  $T_0$  是暂态开路时间常数,它表征了定子开路时转子暂态的衰减。

## 2 风电对接入电网的影响

与常规发电机不同,异步感应风力发电机运行时,需要从系统中吸收无功功率进行励磁,将会造成系统功率因数变坏和接入点母线电压水平的降低,所以在异步感应风力发电机的机端需要加装无功补偿装置。当采用并联电容器作为无功补偿装置时,该无功补偿量与风力发电机组端电压的平方成正比,当系统发生故障造成母线电压降低时,将导致无功补偿量下降,进而会进一步恶化系统的电压水平。文献[14]中提出采用静止无功补偿器 STATCOM 为风电场提供无功功率,能提高系统的稳定水平。当风电场由于保护装置动作与系统解列时,系统因失去无功负荷将会造成系统电压水平的局部升高。总之,风电场的运行会影响到系统电压的质量和稳定性。

风电场大多位于系统的边缘地区,与系统的联系比较薄弱。从风电场运行的经验来看,风电场对系统的影响主要是电压问题。风电场对系统电压的影响主要包括电压波动、闪变以及波形畸变等<sup>[3,4,15]</sup>。

随着风力发电机组单机容量的增大,在并网时对电网的冲击影响也越来越大,严重时不仅引起系统冲击电流水平过高、电压水平的大幅度下降,并且可能对发电机和机械部件造成损坏;如果并网冲击时间持续过长,还可能使电力系统瓦解或威胁到其他并网机组的正常运行,因此采用合理的并网技术是一个不可忽视的问题。

由于目前风电不参与电网的调频调压任务,所以大规模风电接入电网后,风电对电网的影响将会比较突出,风电引起电网的稳态频率和电压偏移很

可能超出电网的允许范围,特别是在大的风速扰动、故障方式下,风电还将很可能使得电网电压失去稳定。此外,系统故障对风电接入容量也有很大限制,甚至使风电场电压大幅度跌落而失去稳定。

本文接下来将结合河南方城风电场,对相关问题展开研究分析。

## 3 实际算例分析

本文基于 PSASP 的用户程序接口 (UPI),采用 Visual C++ 编写了用于风电潮流和稳定计算的用户程序,分别从稳态和暂态两方面对河南方城风电场进行相应的仿真分析。

### 3.1 方城风电场简介

方城风电场位于河南省南阳市方城县境内东北部,距县城约 10 km。因山地突然沉陷而形成自然缺口,东北窄西南宽,呈喇叭形,是南北气团进出南阳盆地的走廊,风大风多,俗称“风口”。方城县属季风气候,全年最多风向为东北风,次多风向为西南风。

风场分为两个场区。北区西起齐庄,东至老坡场附近,东西长约 10 km、南北宽约 2 km;南区风电场西起石窝、五神庙,东至小酒店、张庄之间,长约 7.3 km、宽约 2.5 km。

工程规划最终装机 50 MW,分两期建设,一期规划开发建设的 30 台风机全部位于北区,总装机容量 22.5 MW。风电场机组的单机容量为 750 kW,采用新疆金凤科技出厂的 S50-750 kW 型异步电机。

风力发电机额定输出电压为 0.69 kV,采用“一机一变”单元式接线,单机箱变容量为 800 kVA,电压变比为 10/0.69 kV,采用四回 10 kV 架空线路送至风电场内新建的 110 kV 变电站。

方城风电场与电网的地理连接图如图 2 所示。

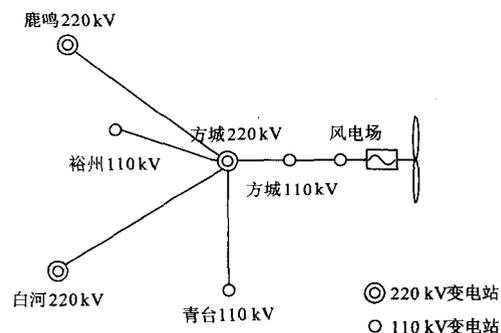


图 2 方城风电场电网地理接线图

Fig.2 Geographic wiring diagram of Fangcheng wind farm

### 3.2 风电场无功补偿容量的确定

风电场参与电压调节的方式包括调节风电场的

无功功率和调整风电场升压变电站主变压器的变比。风电场无功功率应当能够在其容量范围内进行自动调节, 使风电场变电站高压侧电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定电压的 10%, 风电场变电站的主变压器宜采用有载调压变压器。

参考有关功率因数的规定, 当风电机组运行在不同的输出功率时, 风电机组的可控功率因数变化范围应在  $-0.95 \sim 0.95$  之间。

风力发电机的功率因数与其出力有关, 而利用异步发电机的稳态等值电路方程式可以计算出其有功功率和无功功率与转子滑差和端电压的关系式, 进而可以得到异步风力发电机的功率因数与转子滑差的关系, 如图 3 所示。

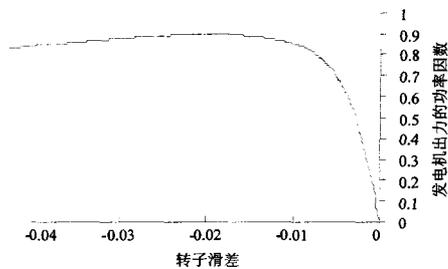


图 3 发电机功率因数与转子滑差的关系

Fig.3 Relation of the generator power factor and the rotor speed-slip

由图 3 可以看出, 转子滑差小于  $-0.01$  时, 风力发电机的功率因数波动不大, 但当风力发电机的转速较低时, 风力发电机的功率因数很小, 如当转子滑差为  $-0.002$  时, 其功率因数为  $0.36786$ 。当风速较小时, 风力发电机的有功功率出力很小, 但从电网中吸收的无功功率仍然很大, 需要投入适量机端并联电容器以提高电网的电压水平。

表 1 无功补偿计算的结果

Tab.1 Results of the reactive power compensation calculation

运行方式	无功补偿/组	风电 110/风电机组端电压/kV	功率因数
风电场 30%出力	1	112.15/9.99	-0.538
	2	113.86/10.25	-0.71
	3	115.65/10.52	-0.943
风电场 60%出力	1	112.29/10.004	-0.78
	2	113.95/10.27	-0.885
	3	115.844/10.5457	-0.977
风电场 100%出力	1	111.91/9.95	-0.877
	2	113.72/10.22	-0.935
	3	115.61/10.51	-0.98

风电场的无功电源包括风电机组和无功补偿装置。本文算例中风电场无功补偿度为主变容量的 20%; 风力发电机组无功补偿装置采用可自动分组投切的并联电容器, 容量  $3 \times 90$  kVar, 无功补偿度为

单台发电机额定容量的 48%。

由于风电场的接入造成接入点母线的电压水平和功率因数变坏, 因此应投入机端并联的电容器以补偿机组所需的无功功率。无功补偿装置计算结果如下表 1 所示。

由表 1 知道, 风电场 30%出力时, 风电场接入点的电压水平和功率因数较低, 需要投入 3 组无功补偿装置, 可以提高功率因数至  $-0.943$ ; 风电场 60%出力和风电场 100%出力时, 投入 3 组分别可以提高功率因数至  $-0.977$ 、 $-0.98$ 。

### 3.3 风电机组并网分析

异步发电机运行时, 对机组的调速精度要求不高, 不需要同步设备和整步操作, 只需要发电机转速接近同步转速时, 就可以并网运行。

正常运行中的风电场, 因风机故障或检修等原因, 常常需要对某台机组进行启停操作。所以有必要研究风电场中单台机组接入对电网的冲击影响。

风力发电机组并网前接入点两侧母线的电压如表 2 所示。假定并网前后风速保持  $13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  不变。

表 2 并网前两侧母线的电压

Tab.2 Bus voltage before integration

参数	风电场母线	系统侧母线
电压幅值/p.u.	0.966	0.966
电压相角/ (°)	256	350

风电场中的某台风机由于某种原因在  $t=1$  s 时刻, 与电网断开, 再次并网之前由机端并联电容自励建立机端电压, 在  $t=2$  s 时, 该风机并入电网, 并网时产生的冲击电流如图 3 所示, 该冲击电流的最大幅值是其稳定运行时的 4.84 倍。在电网的拉动下, 风力发电机的转子加速, 经过几个摇摆周期后, 风力发电机稳定运行在发电状态, 向系统输送功率。

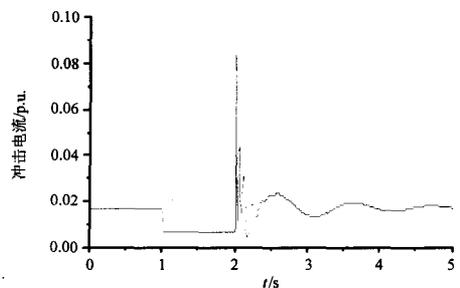


图 4 冲击电流曲线

Fig.4 Impactive current curve

当风电场与系统侧母线电压的幅值和频率相等时, 其电压相角差由  $0^\circ$  到  $180^\circ$  依次增大时, 风电机组并网时产生的冲击电流逐步增大, 如图 4 所示。当风电场和系统侧母线电压相差为  $180^\circ$  时, 风电

场并网时产生的冲击电流最大, 该冲击电流的幅值是其稳态运行时的 9.53 倍。

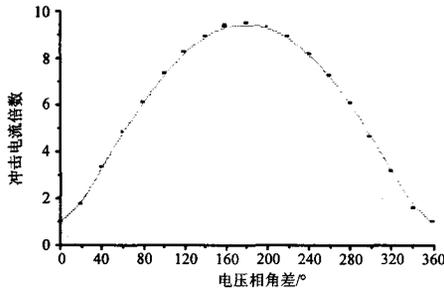


图 5 不同电压相角下并网时的冲击电流的大小  
Fig.5 Impactive current level under different voltage phase angle

由上面分析可知, 单台机组并网时会产生一个很大的冲击电流, 且对风电场附近的母线电压造成了一定的影响, 但不会影响到电网的安全稳定问题。

### 3.4 风电场接入对电网的稳定性分析

含风电场电力系统的暂态稳定是指该系统在某个运行情况下突然遭受到大的干扰后, 能否恢复到原来的状态或经过暂态过程达到新的稳定运行状态。

风电场初始运行风速为  $13.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 选取风电场与电网的联络线在  $t=1 \text{ s}$  时刻发生三相接地短路故障,  $0.1 \text{ s}$  后故障切除。故障前后风电场电压、电流的曲线如图 6、图 7 所示。

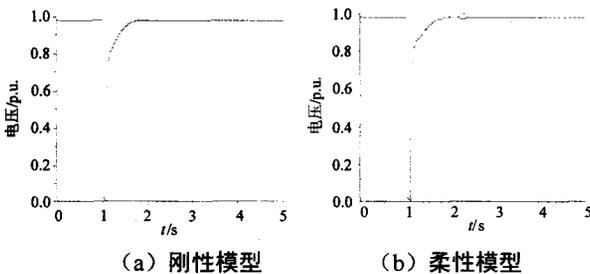


图 6 故障时电压曲线

Fig.6 Voltage curve under fault model of shaft system

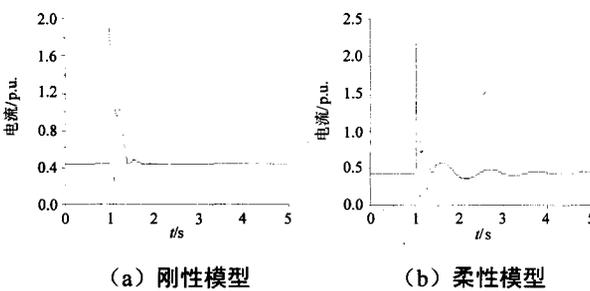


图 7 故障时电流曲线

Fig.7 Current curve under fault

由图 6 可以看出, 故障切除后, 风电场的电压经过 0.8s 左右恢复了正常水平, 在该故障下, 不会

出现电压失稳问题。

由图 7 可以看出, 风电场与系统的联络线发生三相接地短路故障时, 风电场会出现一个幅值较大的短路电流, 该短路电流在故障切除后, 经过几个减幅振荡恢复稳定。传动系统采用柔性模型计算的短路电流稍大一些。说明传动系统采用刚性模型计算的结果比采用柔性模型计算的结果偏于乐观。这与文献[12]得到的结论是一致的。

研究风电场对短路电流和短路容量的影响。比较分析了风电场节点接异步感应风力发电机和常规同步发电机两种情况的短路电流水平和短路容量, 选取风电场与电网的联络线发生三相短路, 计算结果如表 3 所示。

表 3 短路电流水平

Tab.3 Short-circuit current level

参数	风电场	常规同步机
短路电流/kA	4.56	5.83
短路容量/MVA	909.14	1160.58

由表 3 可以看出, 与常规同步发电机相比, 风电场的接入可以降低短路电流和短路容量的水平。

## 4 结论

本文首先对风电场的各个环节进行建模分析, 建立了风力涡轮机的空气动力模型、传动系统的柔性模型和风力发电机的简化模型。

结合河南方城风电场的实际情况, 利用 PSASP 计算程序对其接入电网后产生的影响进行仿真分析:

(1) 风电机组的功率因数与转子转速密切相关: 转速较低时, 功率因数较小; 转速较高时, 功率因数较高, 且变化不大。

(2) 风电机组并网时产生的最大冲击电流幅值是其稳态运行时的 9.53 倍。

(3) 传动系统采用刚性模型在系统发生故障时的计算结果比采用柔性模型偏于乐观。

(4) 与常规同步发电机相比, 异步感应风力发电机对短路电流和短路容量的贡献小, 是其 78.3%。

## 参考文献

[1] 国家电网公司. 各区域电网装机容量[EB/OL]. <http://www.sgcc.com.cn>. 2008-05-08.

[2] Global Wind Energy Council. GWEC Releases Global Wind 2007 Report[EB/OL]. <http://www.gwec.net>. 2008-04-01.

[3] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27 (12): 62-66, SUN Tao, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu. Voltage

- Fluctuation and Flicker Caused by Wind Power Generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-66.
- [4] 吴学光, 张学成, 印永华. 异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6):68-72.  
WU Xue-guang, ZHANG Xue-cheng, YIN Yong-hua. Application of Models of the Wind Turbine Induction Generators to Wind Power System Dynamic Stability Analysis[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 68-72.
- [5] 韩民晓, 崔军立, 姚蜀军. 大量风电引入电网时的频率控制特性[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1):29-33.  
HAN Min-xiao, CUI Jun-li, YAO Shu-jun. Frequency Control Characteristics for a Power System with Large Amounts of Wind Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 29-33.
- [6] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.  
LI Dong-dong, CHEN Chen. A Study on Dynamic Model of Wind Turbine Generator Sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119.
- [7] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.  
YIN Ming, LI Geng-yin, ZHANG Jian-cheng, et al. Modeling and Control Strategies of Directly Driven Wind Turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65.
- [8] 徐娇, 李兴源. 异步风力发电机的简化RX模型及其潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1):22-25.  
XU Jiao, LI Xing-yuan. A Simplified RX Model of Asynchronous Wind Generators and Load Flow Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 22-25.
- [9] Petru T, Thiringer T. Modeling of Wind Turbines for Power System Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1132-1139.
- [10] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [12] Heier S. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems[M]. John Wiley and Sons, 1999.
- [13] Vladislav A. Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power[D]. Technical University of Denmark, 2003.
- [14] Haizea, Gaztanaga, Ion E-O. Real-Time Analysis of the Transient Response Improvement of Fixed-Speed Wind Farms by Using a Reduced-Scale STATCOM Prototype[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 658-665.
- [15] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 91-94.  
CAO Na, ZHAO Hai-xiang, DAI Hui-zhu. Analysis on Reactive Power and Voltage of Commonly Used Wind Turbines Interconnected to Power Grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 91-94.

收稿日期: 2008-10-25; 修回日期: 2008-12-12

作者简介:

田春笋(1982-), 男, 硕士, 从事电力系统规划、电力系统建模、仿真, 分析等方面的研究; E-mail: chunzheng\_tian@yahoo.cn

李琼林(1980-), 男, 博士, 从事电力系统建模与仿真、电能质量分析与控制等方面的研究;

宋晓凯(1971-) 男, 高级工程师, 从事大电网分析与计算、谐波计算分析、电网规划与设计等方面的研究。

(上接第 25 页 continued from page 25)

- ZHANG Xiao-bai, GAO Zong-he, QIAN Yu-mei, et al. Implementation of Preventive and Remedial Control for Tie Line Overload by Use of Automatic Generation Control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 55-59(in Chinese).
- [6] 梁寿愚, 赵旋宇, 李矛, 等. 南方电网对中调的 CPS 考核方案及其实现[J]. 南方电网技术研究, 2007,3(2): 46-57.  
LIANG Shou-yu, ZHAO Xuan-yu, LI Mao, et al. Algorithm of Real-time Detection Low-frequency Oscillation in Power System Based on the SCADA Data[J]. Southern Power System Technology, 2007,3(2):46-57.
- [7] 卢勇, 贺祥飞, 刘友宽, 等. 云南电网一次调频试验工作现状及策略分析[J]. 中国电力, 2006, 39(11):42-45.  
LU Yong, HE Xiang-fei, LIU You-kuan, et al. Field Test and Strategy Analysis of Primary Frequency Control in Yunnan Power Grid[J]. Electric Power, 2006, 39(11):42-45.

收稿日期: 2008-10-23; 修回日期: 2008-12-03

作者简介:

王珍意(1980-), 男, 硕士, 主要从事电网调度运行工作; E-mail: adminhust@163.com

谢一工(1972-), 男, 从事电网调度运行管理工作;  
尹成全(1978-), 男, 从事电网调度工作。